

Anforderungen an eine Ökobilanz im Bereich der Elektromobilität aus Sicht der Chemieindustrie

– Einführung zum Manual „Daten- und Qualitätsstandards für Ökobilanzen zu PKW-Antrieben“ –

Hintergrund

Die Bedeutung der Elektromobilität und alternativer Antriebskonzepte in zentralen industriellen Wertschöpfungsketten in Deutschland wird in der Öffentlichkeit und Politik immer noch nicht ausreichend gewürdigt. Für die Vorbereitung weiterer Investitionen sind die Rahmenbedingungen für Innovationen in der Elektromobilität von der Politik weiterzuentwickeln und die Förderaktivitäten der Ressorts weiterhin konsequent umzusetzen. Diese Förderaktivitäten müssen aber aus Sicht der Chemie stärker priorisiert werden, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen stärker als bisher im Sinne der künftigen Wertschöpfung am Forschungs- und Produktionsstandort Deutschland zu bündeln.

Für eine derartige Priorisierung der Forschungsthemen müssen die technologischen Optionen fair gegeneinander abgewogen werden können. An Politik und Öffentlichkeit gelangt allerdings in vielen Fällen eine verzerrte Bewertung, wobei insbesondere die für die Chemieindustrie wichtige Lithium-Ionen-Batterie durch zum Teil „unsaubere“ Ansätze zur Lebenszyklus-Analyse (LCA) „schlecht gerechnet“ wird. Damit werden die für die Forschung notwendige Technologieoffenheit eingeschränkt und Chancen für die Forschung und Entwicklung im Bereich der Chemie vernachlässigt. Dies betrifft nicht zuletzt Fragen zur Rohstoffverfügbarkeit und zu Recyclingmöglichkeiten.

Ziele

Der VCI möchte sich in seinen zukünftigen Arbeiten weiterhin für die Umsetzung seiner Forderungen nach adäquater Prioritätensetzung in der Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität einsetzen. Das Öko-Institut hat sich zum Ziel gesetzt, die Lebenszyklusbeurteilung für komplexe Technologiefelder weiterzuentwickeln und durch sorgsam erstellte LCA mit realen Daten die Technologieentwicklung zu begleiten. Für die Vorbereitung weiterer Diskussionen haben nunmehr das Öko-Institut und der VCI daher die Anforderungen erarbeitet, unter denen eine LCA zu PKW-Antrieben methodisch sauber durchgeführt werden kann, um damit zu einer Versachlichung der Diskussion beizutragen.

Diese Anforderungen möchten das Öko-Institut und der VCI mit den relevanten Stakeholdern und Netzwerken diskutieren. Das vorliegende Manual möchte maßgebliche Akteure dazu inspirieren und motivieren, qualitativ hochwertige und aussagekräftige Ökobilanzen zu PKW-Antrieben zu finanzieren, mit Rat und Daten zu unterstützen und ihre Ergebnisse angemessen zu kommunizieren. Da über die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) dort maßgebliche Akteure involviert sind, möchten VCI und Öko-Institut die Aufmerksamkeit der NPM auf dieses Manual lenken. Letztlich adressiert das Manual Wertschöpfungsketten zentraler deutscher Industriebranchen in Milliardenhöhe. Das im Folgenden vorgestellte Manual soll als Grundlage für eine objektive Bewertung der ökologischen Dimension dieser Wertschöpfungsketten dienen.

Daten- und Qualitätsstandards für Ökobilanzen zu PKW-Antrieben

Manual

Darmstadt,
08.02.2019

Autoren

Dr. Matthias Buchert
Cornelia Merz
Jürgen Sutter

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Anforderungen an eine Ökobilanz im Bereich der Elektromobilität aus Sicht der Chemieindustrie – Einführung zum Manual „Daten- und Qualitätsstandards für Ökobilanzen zu PKW-Antrieben“ –	1
Executive Summary	4
1. Hintergrund, Inhalt und Ziel des Manuals	5
2. Methodische Anforderungen	6
3. Notwendige Datengrundlagen und Datentransparenz	11
4. Resümee und Ausblick	18
Abkürzungsverzeichnis	19

Executive Summary

Dieses Manual soll einen Beitrag zur wichtigen Versachlichung der Debatte um Ökobilanzen von PKW-Antriebssystemen leisten. Es bietet eine Zusammenfassung der methodischen Anforderungen sowie eine Übersicht hinsichtlich notwendiger Datengrundlagen und -transparenz. Ziel ist, eine Grundlage zur vorurteilsfreien und ergebnisoffenen vergleichenden Ökobilanzierung von PKW mit unterschiedlichen Antriebssystemen bereitzustellen. Es richtet sich an Ersteller und Auftraggeber vergleichender Ökobilanzen für PKW sowie Multiplikatoren wie Fachmedien.

Für die Durchführung der Ökobilanz existiert mit den Normen EN ISO 14040/14044 eine klare Vorgabe, die neben Anforderungen an die methodische Vorgehensweise und an die Datengrundlagen der Ökobilanz Empfehlungen gibt, wie Ergebnisse interpretiert werden dürfen. Das Ziel der Ökobilanz, der Untersuchungsrahmen, die funktionelle Einheit und die Systemgrenzen müssen klar und transparent kommuniziert werden. Wesentlich ist die Einhaltung des sogenannten Äquivalenzprinzips, damit ein Vergleich angemessen ist. Das heißt, dass z. B. gleichwertige Fahrzeugtypen bzw. -klassen verglichen werden. Somit dürfen für einen alleinigen Vergleich der Antriebstechnologie z. B. nicht ein Kleinwagen mit Benzinmotor und ein vollelektrisches Oberklassenfahrzeug miteinander verglichen werden, da hier zwei wesentliche Eigenschaften variiert werden.

Die Auswahl der Daten muss insbesondere dem Ziel der Studie entsprechen und sich nach der mit diesem Ziel festgelegten Systemgrenze sowie dem zeitlichen, technologischen und geografischen (z.B. Strommix der Nutzungsphase von Elektroautos) Bezugsraum richten. Es empfiehlt sich daher eine Unterteilung der Ergebnisse in mindestens folgende Module:

- i) Herstellung des Fahrzeugs inkl. aller Vorketten,
- ii) Bereitstellung der Antriebsenergie (Stromvorkette, Kraftstoffvorkette)
- iii) Betrieb des Fahrzeugs und
- iv) Verwertung am Lebensende.

Es ist bei Ökobilanzen aufgrund des globalen Anspruchs und des damit inhärent sehr großen Umfangs im Allgemeinen nicht möglich, alle Aspekte mit sicheren Daten zu hinterlegen, sodass bei der realen Umsetzung u. U. auch auf schwächere Daten zurückgegriffen werden muss. Transparenz bezüglich Datenschwächen ist essentiell, d.h. man muss denjenigen Ökobilanzen skeptisch gegenüber stehen, die keine Datenunsicherheiten darstellen.

Aussagen, die auf Ökobilanzergebnissen basieren, müssen in ihrer Tragweite und Eindeutigkeit grundsätzlich mit einer angemessenen methodischen Qualität und Datengüte der Arbeit korrespondieren. Die einschlägigen Normen geben umfassende Orientierung zur Erstellung qualitativ guter Ökobilanzen. Auf der Datenseite sind Schlüsselkriterien zu erfüllen. Es ist ausreichend darzulegen, welche Annahmen für die vergleichende Ökobilanz getroffen worden sind, wie z. B. angesetzter PKW-Typ, die Lebenslaufleistung des PKW inkl. des Antriebssystems oder die geografische und zeitliche Repräsentativität/Bezugsraum der Eingangsdaten. Den Herausforderungen, die sich durch dynamische technologische Entwicklungen ergeben, kann durch Sensitivitätsanalysen begegnet werden. Das vorliegende Manual gibt klare Orientierung für die Erstellung vergleichender Ökobilanzen von PKW mit unterschiedlichen Antrieben. Es bietet zugleich eine Hilfestellung zur Identifikation und Klarstellung missbräuchlicher Verwendung oder einseitiger Interpretationen von Ökobilanzergebnissen durch Dritte.

1. Hintergrund, Inhalt und Ziel des Manuals

Ökobilanzen (LCAs) zu PKW haben in den letzten Jahren vor allem aufgrund der größeren Auffächerung des möglichen Antriebsstrangs eine stark gestiegene Aufmerksamkeit erhalten. Neben PKW mit klassischen Verbrennungsmotoren für flüssige Kraftstoffe wie Diesel oder Benzin (ICEV) sind zunehmend PKW mit „alternativen“ Antrieben auf dem Markt: Erdgasfahrzeuge, vollelektrische PKW (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV), Hybride (HEV) oder auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV).

Die „alternativen“ Antriebe rufen Fragen nach ihrer ökologischen Performance hervor und zu Recht werden vergleichende Ökobilanzen für PKW verlangt, die alle Phasen des Lebenszyklus – also Herstellung des PKW mit allen vorgelagerten Ketten inkl. der Rohstoffgewinnung, Nutzungsphase des PKW und seine Verwertung am Lebensende (End-of-Life) – abdecken. Das Interesse daran ist uneingeschränkt zu begrüßen. So wurden und werden diverse LCAs oder Klimabilanzen im deutschen, europäischen sowie internationalen Kontext zum Vergleich von PKW-Antriebssystemen publiziert und finden oft deutlichen Niederschlag in Medien und Sekundärveröffentlichungen.

Allerdings zeigen diverse Beispiele in jüngster Zeit, dass auf Basis entsprechender Bilanzen nicht eine Versachlichung der Debatte zu beobachten ist, sondern – in z. T. sehr emotionaler Weise – das Gegenteil. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Einigen Ökobilanzen mangelt es an Transparenz hinsichtlich der Datengrundlagen oder der Qualität der Daten und/oder die Interpretationen der Ergebnisse sind nicht ausreichend belegt bzw. die Einschränkungen der Aussagekraft nicht angemessen dargelegt. Durch die Vielzahl der Ökobilanzen kommen unterschiedliche Ergebnisse und Aussagen in die Öffentlichkeit, die die kontroversen Debatten zusätzlich befeuern.

Viel zu selten wird der Tatsache Rechnung getragen, dass es sich gerade bei vielen „alternativen“ Antrieben um vergleichsweise neue Wertschöpfungsketten handelt, d. h. hier ein ausgesprochen dynamischer Industriesektor vorliegt mit entsprechend rasanten Veränderungen in den Produktionsketten. Weiterhin ist die spezifische Umweltbelastung an vielen Stellen stark durch den angesetzten Strommix bestimmt, der sowohl örtlichen Unterschieden als auch dynamischen Veränderungen unterliegt. Häufig sind nicht die Ersteller der Ökobilanzen für Irritationen verantwortlich, sondern Dritte wie Medienvertreter, die nur Teilergebnisse aufgreifen und die Ergebnisse der Ökobilanz falsch oder zumindest missverständlich transportieren.

Dieses Manual von Fachleuten des Öko-Instituts soll einen Beitrag zur wichtigen Versachlichung der Debatte um Ökobilanzen von PKW-Antriebssystemen leisten. Es bietet auf wissenschaftlicher Grundlage eine zusammenfassende Darstellung der methodischen Anforderungen sowie eine Checkliste hinsichtlich notwendiger Datengrundlagen und Datentransparenz mit dem Ziel **eine Grundlage zur vorurteilsfreien und ergebnisoffenen vergleichenden Ökobilanzierung von PKW mit unterschiedlichen Antriebssystemen bereitzustellen**. Umgekehrt ist es nicht Ziel des Manuals Empfehlungen für andere Ökobilanzierungen wie z. B. Flottenbilanzen von PKW aufzustellen. Dieses Manual richtet sich an Ersteller und Auftraggeber vergleichender Ökobilanzen für PKW mit unterschiedlichen Antrieben sowie Multiplikatoren wie Fachmedien, die für eine entsprechende Handreichung zur Bewertung und Einordnung veröffentlichter Ökobilanzergebnisse gute Verwendung finden können.

2. Methodische Anforderungen

Für die Durchführung der Ökobilanz existiert mit den Normen EN ISO 14040/14044 eine klare Vorgabe, die neben Anforderungen an die methodische Vorgehensweise und an die Datengrundlagen der Ökobilanz auch Empfehlungen gibt, wie Ergebnisse interpretiert werden dürfen.

Nach den international gültigen ISO-Normen besteht eine Ökobilanz aus vier Schritten

- i) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- ii) Sachbilanz
- iii) Wirkungsabschätzung
- iv) Auswertung

Die **Zieldefinition** beschreibt, welche Produktsysteme oder Dienstleistungen miteinander verglichen werden und legt die für die Ökobilanz entscheidenden methodischen Verabredungen fest, z. B. funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Allokationen, Anforderungen an Daten etc. (zur Erklärung der Begriffe s. folgende Seite).

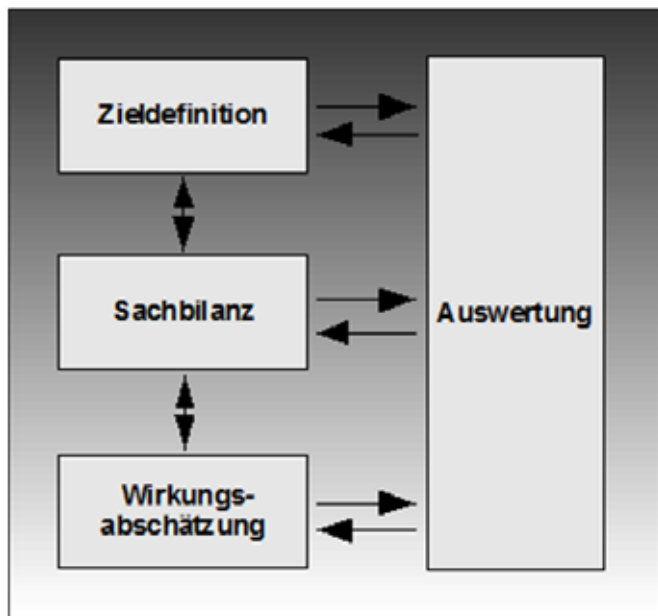
In der **Sachbilanz** werden die erforderlichen Daten zu eingesetzten Ressourcen (Materialien und Energieträger), zu Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie zu Abfällen zusammengetragen und berechnet.

In der **Wirkungsabschätzung** werden die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Umwelt, die von den in den einzelnen Prozessschritten freigesetzten Schadstoffen ausgehen können, einer überschaubaren Anzahl von Wirkungskategorien (z. B. Treibhauseffekt, Eutrophierung, Versauerung) zugeordnet und hinsichtlich ihrer Umweltwirkung quantifiziert. Hierzu werden die in der Sachbilanz zusammengestellten Stoffflüsse mit Hilfe von sogenannten Charakterisierungsfaktoren auf die entsprechenden Wirkungsindikatoren (z. B. Kohlendioxidäquivalente) umgerechnet und aufsummiert.

In der **Auswertung** der Ökobilanz geht es darum, die Ergebnisse für die betrachteten Produkte in den einzelnen Wirkungskategorien zu einer Endaussage zusammenzuführen. Dies muss transparent und nachvollziehbar nach einer vorher festgelegten Methode erfolgen, um Annahmen und Interpretationen nachvollziehbar machen zu können. In der Auswertung sollen signifikante Stellgrößen identifiziert und ihr Einfluss auf das Ergebnis mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen dargestellt werden. Wenn sich beispielsweise herausstellt, dass die Laufleistung (z. B. 200.000 km) der verglichenen PKW mit unterschiedlichen Antrieben (z. B. ICEV vs. BEV) einen deutlichen Effekt auf die Ökobilanz zeigt, muss die Rechnung auch mit einer höheren und einer niedrigeren Laufleistung (z. B. 150.000 km und 250.000 km) durchgeführt werden, um den Einfluss herauszuarbeiten.

Abbildung 2-1 zeigt das grundlegende Konzept und die generelle Vorgehensweise einer Ökobilanz, wie sie nach den einschlägigen und anerkannten Vorgaben der EN ISO 14040/14044 durchgeführt wird. Ziel ist es sicherzustellen, dass die zu untersuchenden Systeme umfassend über ihren gesamten Lebensweg erfasst werden und nach Möglichkeit alle ergebnisrelevanten Umwelteinwirkungen in der Bilanz Berücksichtigung finden. Häufig ist es zielführend, dass diese vier Schritte iterativ vorgenommen werden, so dass Erkenntnisse aus den Bilanzierungsarbeiten in vorherige Stufen aufgenommen werden können.

Abbildung 2-1: Schritte einer Ökobilanz



Quelle: eigene Darstellung

Im Folgenden werden wesentliche Aspekte näher erläutert, die in einer Ökobilanzstudie transparent dargestellt werden müssen.

i) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

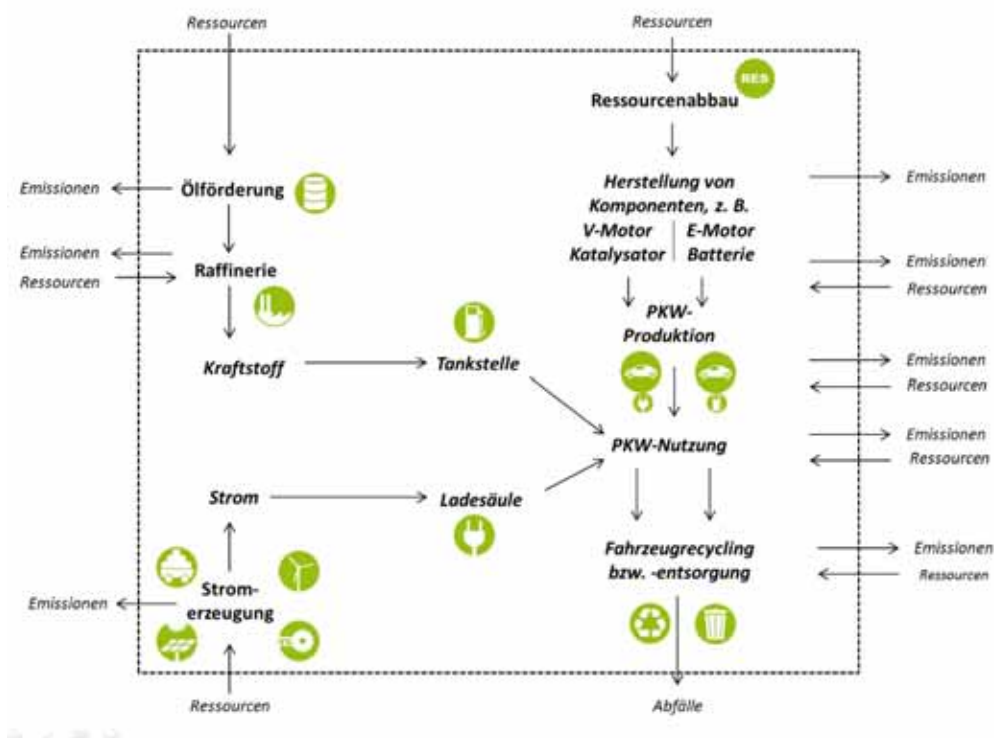
Einleitend soll das **Ziel der Ökobilanz** klar benannt werden. Welche Fragen sollen beantwortet, welche Antriebssysteme verglichen werden? An welche Zielgruppen richtet sich die Studie?

Der **Untersuchungsrahmen** einer Ökobilanz muss die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems eindeutig festlegen. Die **Funktionelle Einheit (FU)** ist die Bezugs- und Vergleichsgröße, auf die In- und Outputflüsse aus der Sachbilanz normiert werden. Auf sie werden auch alle Umweltbelastungen umgerechnet. Aus diesem Grund muss die funktionelle Einheit eindeutig definiert sowie messbar sein. Die Funktionelle Einheit kann bei der Bewertung von Antriebssystemen z.B. die Nutzung eines PKWs über die gesamte Laufzeit sein, die Nutzung eines PKWs bezogen auf einen gefahrenen Kilometer (Fahrzeugkilometer) oder die Nutzung eines PKWs pro Person und pro Kilometer (Personenkilometer). Ökobilanzielle Vergleiche von Antriebssystemen werden i. d. R. auf einen Fahrzeugkilometer bezogen.

Die **Systemgrenze** legt fest, welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sind (siehe Abbildung 2-2). Die Auswahl der Systemgrenze muss mit dem Ziel der Studie übereinstimmen, die Kriterien zur Festlegung der Systemgrenze müssen beschrieben und erläutert werden. Wenn unterschiedliche Antriebssysteme bewertet werden sollen (z. B. Diesel-ICEV vs. BEV) ist es notwendig, auch die Produktionsketten und Verwertung der Fahrzeuge in die Rechnung miteinzuschließen, da diese relevante Unterschiede aufweisen. Bei der Beschreibung der in die Ökobilanz einbezogenen Prozesse muss eine Einordnung der technologischen, geografischen und zeitlichen Repräsentativität vorgenommen werden, das heißt, für welche Technologien sind die Ergebnisse aussagekräftig? Für welchen Zeitraum und für welche geografische

Region gelten sie?

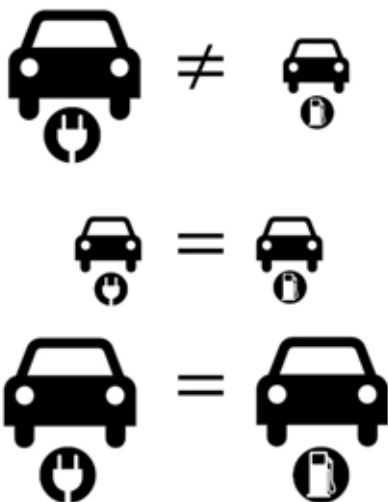
Abbildung 2-2: Mögliche Systemgrenzen einer PKW-Ökobilanz



Quelle: Eigene Darstellung (vereinfachtes Schema)

Wesentlich ist die Einhaltung des sogenannten **Äquivalenzprinzips**, damit ein Vergleich angemessen ist. Das heißt, dass im Regelfall z. B. gleichwertige Fahrzeugtypen bzw. -klassen verglichen werden. Wenn in einer Bilanz sehr unterschiedliche Fahrzeugklassen einander gegenübergestellt werden, kann es sein, dass die beobachteten Unterschiede nicht auf die unterschiedlichen Antriebssysteme, sondern auf die unterschiedlichen Größenklassen zurückzuführen sind. Somit dürfen für einen alleinigen Vergleich der Antriebstechnologie z. B. nicht ein Kleinwagen mit Benzinmotor und ein vollelektrisches Oberklassenfahrzeug miteinander verglichen werden, da hier zwei wesentliche Eigenschaften variiert werden (zur Veranschaulichung siehe Abbildung 2-3).

Abbildung 2-3: Äquivalenzprinzip für Ökobilanzen unterschiedlicher Antriebe



Quelle: eigene Darstellung

ii) Sachbilanz

Das Vorgehen bei der Erhebung der **Daten** muss sorgfältig beschrieben werden, ebenso die genaue Herkunft der jeweiligen Daten und eine Einschätzung der Datenqualität. Siehe hierzu auch Kapitel 3.

Wenn in einem Produktionsprozess mehrere Produkte erzeugt werden, stellt sich die Frage, wie die Umweltlasten aufgeteilt werden. Zum Beispiel werden in einer Erdölraffinerie eine Vielzahl von Raffinerieprodukten gewonnen, neben Benzin und Diesel auch Flüssiggas, Kerosin, Heizöl, Schweröl und andere. Die Aufteilung der Umweltlasten auf verschiedene Produkte, im gewählten Beispiel die Lasten aus Erdölförderung und Raffinierung auf die Raffinerieerzeugnisse, nennt man **Allokation**. Da in industriellen Produktionsprozessen häufig solche Koppelproduktionen auftreten, ist es sehr wichtig, genau zu beschreiben, wie in solchen Fällen vorgegangen wurde.

iii) Wirkungsabschätzung

Die Auswahl der **Wirkungskategorien** muss klar dargestellt werden. Insbesondere, wenn bestimmte gängige Wirkungskategorien nicht miteinbezogen werden, muss dies nachvollziehbar begründet sein. Auch die Methodik der Wirkungsabschätzung muss beschrieben werden, das heißt, welche Modelle zur Festlegung der Charakterisierungsfaktoren gewählt wurden, nach der unterschiedliche Stoffflüsse, die in einer Kategorie Auswirkungen haben, auf eine Bezugsgröße, z. B. CO₂-Äquivalente (Treibhausgasemissionen), SO₂-Äquivalente (Säurebildner-Emissionen) umgerechnet werden. Dies kann z. B. die Methode nach CML oder ReCiPe o. a. sein.

Die Ergebnisse der Wirkungskategorien können mit verschiedenen Methoden weiter aggregiert werden. Dies kann z. B. bedeuten, dass die Umweltwirkungen letztendlich auf eine einzige Zahl aggregiert werden, die dann mit dem entsprechenden Wert des Referenzsystems verglichen werden kann. Eine andere Möglichkeit ist eine Normalisierung, bei der die verschiedenen Wirkungskategorien in Bezug gesetzt werden zur Gesamtlast der jeweiligen Umweltwirkung. Auch diese, nach den ISO-Normen optionalen Interpretationsmethoden müssen transparent

beschrieben sein.

iv) **Auswertung**

Im Rahmen der **Auswertung** soll eindeutig dargestellt werden, wie belastbar die Ergebnisse sind und vor allem für welche Antriebssysteme die Interpretationen und Schlussfolgerungen zutreffen und für welche nicht. Außerdem ist die Herausarbeitung der ergebnisbestimmenden Parameter und – falls unsicher oder methodenabhängig – die Darstellung des Einflusses der Variation des Parameters anhand von Sensitivitätsanalysen vorzunehmen.

Wenn in einer Ökobilanz verschiedene am Markt konkurrierende Systeme, z. B. Fahrzeugantriebe, verglichen werden und die Studie publiziert wird, dann ist nach den ISO-Normen EN ISO 14040 und 14044 bzw. 14071 eine Begutachtung im Rahmen eines sogenannten **Critical Reviews** vorgeschrieben. Hierzu wird ein Review-Panel aus drei unabhängigen Gutachterinnen bzw. Gutachtern eingerichtet, welches die Methodik, die Transparenz der Darstellung, die Auswahl der Daten, die Modellierung und Auswertung analysiert und im Rahmen eines Gutachtens bewertet. Dieses Gutachten wird als Anhang der Studie beigefügt. Dieses Vorgehen sichert die gute wissenschaftliche Praxis und erhöht somit die Glaubwürdigkeit der Aussagen und Schlussfolgerungen.

3. Notwendige Datengrundlagen und Datentransparenz

Die **Auswahl der Daten** orientiert sich an der angesetzten Methodik (s. Kapitel 2). Sie muss insbesondere dem **Ziel der Studie** entsprechen und sich nach der mit Hinblick auf dieses Ziel festgelegten **Systemgrenze**, sowie dem zeitlichen, technologischen und geografischen **Bezugsraum** richten. In umgekehrter Richtung zeigt sich dadurch die Notwendigkeit, dass die Methodik entsprechend der obigen Empfehlungen klar und transparent festgelegt und dargestellt wird, um die Eignung der verwendeten Daten beurteilen zu können.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, erfordert ein ökobilanzieller Vergleich von PKW mit unterschiedlichen Antrieben die Einbeziehung aller Phasen des Lebenszyklus (Abbildung 2-2). Um ausreichend Transparenz zu gewährleisten, empfiehlt sich daher eine Unterteilung der Ergebnisse sowohl der Sachbilanz also auch der Wirkungsabschätzung in mindestens folgende Module:

- v) Herstellung des Fahrzeugs inkl. aller Vorketten,
- vi) Bereitstellung der Antriebsenergie (Stromvorkette, Kraftstoffvorkette)
- vii) Betrieb des Fahrzeugs und
- viii) Verwertung am Lebensende.

Empfehlungen zu wesentlichen Kenngrößen jeder Phase werden im Folgenden dargestellt. In allen Fällen gilt: Im besten Falle können die verwendeten Daten direkt angegeben werden. Ist dies, z. B. aus Gründen der Vertraulichkeit, nicht möglich, soll mindestens ihre Herkunft soweit wie möglich nachvollziehbar sein. Zudem muss eine Einschätzung der Datenqualität in Hinblick auf die technologische, zeitliche und geografische Repräsentativität erfolgen. Falls aufgrund der Datenlage beispielsweise mit älteren Daten oder mit Daten eines anderen geografischen Bezugsraumes gerechnet wurde, muss dies klar benannt und erläutert werden, inwiefern durch die Verwendung von Näherungsdaten ein Einfluss auf das Ergebnis zu erwarten ist.

Zudem können Empfehlungen abgeleitet werden, wie die Datenverfügbarkeit für zukünftige Bilanzen verbessert werden könnte. Im Hinblick auf die technologische Repräsentativität muss gekennzeichnet sein, ob es sich bei den verwendeten Daten um Primärdaten (eigens für den spezifischen Prozess erhoben) handelt, oder ob mit generischen Daten aus Ökobilanzdatenbanken oder der Fachliteratur, oder auch mit Expertenschätzungen gerechnet wurde. Weiterhin ist die Angabe aufschlussreich, ob die Daten auf Messwerten (ggf. in welchem Maßstab) oder auf Simulationen beruhen.

i) Herstellung des Fahrzeugs:

Häufige Synonyme: Produktionsphase

Wichtige Kenngrößen: Pkw-Segment/Gewicht, Materialzusammensetzung, Primär/Sekundärrohstoffanteil, Fertigungsaufwand, zeitlicher und geografischer Bezug

Der **Aufwand der Fahrzeugherstellung** ist bedingt durch die eingesetzten Komponenten, das eingesetzte Material und den mit der Fertigung verbundenen Energieaufwand. Wesentliche Treiber sind dabei Größe bzw. Gewicht des betrachteten Fahrzeugs und die Art des eingesetzten Materials. Ein wichtiger Einflussfaktor ist der technologiespezifische Antriebsstrang. Bei ICEV muss neben dem Verbrennungsmotor sowie dem Getriebe u. a. auch die Bleisäurebatte-

rie und das System der Abgasnachbehandlung berücksichtigt werden. Für BEV stellt neben dem Elektromotor die Batterie eine besonders wichtige Komponente dar. Hier muss dargestellt werden, wie der Aufwand der Batterieherstellung berechnet wurde und welcher geografische (z. B. Bedingungen im Land der Herstellung) und technologische Bezug (z. B. Zellchemie und damit verbundene Rohstoffe) zugrunde liegt. Für alle bilanzierten Antriebssysteme ist auch relevant den angesetzten Primär- bzw. Sekundärrohstoffanteil der wesentlichen Materialien anzugeben, da die Umweltlasten gerade bei den Herstellungsrouten von Metallen hier stark differieren.

Die jeweilige Technologie muss transparent beschrieben und in sich konsistent sein. So muss beispielsweise die angesetzte Kapazität der Batterie zu den technischen Daten des bilanzierten Fahrzeugs passen. Bei Vergleichen muss eine Nutzenäquivalenz sichergestellt sein. Zudem muss erörtert werden, inwiefern die Technologie dem zeitlichen und geografischen Bezugsraum entspricht. Beispielsweise muss dargestellt werden, ob das Fahrzeug einem Neufahrzeug zu einem definierten Jahr entspricht oder einem heute im Einsatz befindlichen Durchschnittsfahrzeug. Bei den neuen Technologien BEV und FCEV spielt das Alter der Sachbilanzdaten eine besondere Rolle, da die Technologien sehr dynamischen Entwicklungen unterliegen. Hier kann es nötig sein, auch die Tendenz möglicher zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen, was beispielsweise im Rahmen von Sensitivitätsanalysen geschehen kann.

Beispiel 1 „Kongruenter technologischer und geografischer Bezugsraum“: Heute fahren in der VR China ein Teil der BEV mit Batterien mit LFP-Kathoden. In Europa kommen für BEV fast nur Batterien mit NMC-Kathoden zum Einsatz. Wenn eine Ökobilanz mit Bezugsraum Europa für die heutige Situation durchgeführt wird, muss daher eine Batterie mit NMC-Kathoden betrachtet werden.

Beispiel 2 „Kongruenter technologischer und zeitlicher Bezugsraum“ Die relativ junge Technologie der Li-Ionen Batterien befindet sich in permanenter Entwicklung in Hinblick auf die Zellchemie. So wird allein die dynamische Verringerung des Kobaltanteils der Batteriezellen bei gleichzeitiger Erhöhung des Nickelanteils nicht ohne Spuren auf die Ökobilanzergebnisse bleiben. Unterschiede hinsichtlich der Datengenerierung von beispielsweise drei Jahren können hier bereits relevant sein.

Da der Vergleich unterschiedlicher PKW-Antriebstechnologien nur in Bezug auf gefahrene Kilometer durchgeführt werden kann (s. Kapitel 2, funktionelle Einheit) ist neben dem Aufwand der Fahrzeugherstellung die **Lebenslaufleistung** des PKW die wesentliche Kenngröße für den Beitrag der Fahrzeugherstellung zur Gesamtbilanz: je weiter das einmal produzierte Fahrzeug fährt, desto geringer ist der relative Beitrag der Herstellung (siehe Abbildung 3-1 b) in iii) Nutzungsphase).

ii) Bereitstellung der Antriebsenergie:

Häufige Synonyme: Stromvorkette, Kraftstoffvorkette, Well-to-tank

Wichtige Kenngrößen: Zeitlicher und geografischer Bezug, Strommix vs. Marginalstrom, Ladestrategie, Infrastruktur

Für batterieelektrische Fahrzeuge hat die Art der **Stromerzeugung** einen wesentlichen Einfluss auf die Ökobilanz. Die Zusammensetzung des Strombezugs der Fahrzeuge muss daher

transparent dargestellt werden.

Da Strom im Gegensatz zu Flüssigkraftstoffen nicht über globale Distanzen transportiert werden kann, muss bei der Produktion auf die geografische Repräsentativität geachtet werden. In der Regel wird hier die landesspezifische Stromerzeugung oder der Großregion (z. B. EU) ausschlaggebend sein. Es muss dargestellt werden, ob der angesetzte Strombezug einem über alle Verbraucher gemittelten Wert (Strommix) entspricht, oder ob eine Marginalbetrachtung¹ durchgeführt wurde. Weiterhin haben flexible Ladestrategien oder eine unterstellte Zusatzlichkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien einen ergebnisbestimmenden Einfluss und müssen bei Bedarf dargestellt und begründet werden.

Zum anderen ist die zeitliche Komponente für die Art des Strombezugs wesentlich, da im Rahmen der von den meisten Ländern angestrebten Dekarbonisierung die Stromerzeugung einem deutlichen Wandel unterworfen ist. Dies erfordert eine klare Einordnung der verwendeten Daten in Hinblick darauf, ob sie auf aktuellen statistischen Quellen beruhen, oder ob eine Modellierung zukünftiger Stromerzeugung zugrunde liegt, und für welchen Zeitraum sie als gültig erachtet werden können. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage relevant, ob für die Bilanz der Energiebezug zu einem festen Zeitpunkt (bspw. ein bestimmtes Jahr) angesetzt wird, oder ob er über die gesamte Lebensdauer des PKW gemittelt wird (siehe Abbildung 3-1 a) in iii) Nutzungsphase).

Ebenso müssen die Daten, die für die **Kraftstoffherstellung** der ICEV und FCEV verwendet werden, nachvollziehbar dargestellt werden. Bei konventionellen Kraftstoffen muss beispielsweise angegeben werden, inwiefern sie eine Beimischung von Biokraftstoffen (oder sonstiger regenerativer Kraftstoffe) berücksichtigen. Falls in FCEV elektrolytischer Wasserstoff eingesetzt wird, muss nachvollziehbar sein, welcher Wirkungsgrad und welche Stromvorkette (s. o.) der Elektrolyse zugrunde liegt.

Im Hinblick auf die **Infrastruktur** zur Herstellung und Verteilung der Antriebsenergien muss erkennbar sein, welche Komponenten (z. B. Raffinerien, Stromerzeugungsanlagen, Elektrolyseure, Kraftstofftransporte, Tankstellen, Ladesäulen) berücksichtigt wurden und was ggf. vernachlässigt wurde. Bezüglich des Vergleichs besteht dabei die Schwierigkeit, dass die Infrastruktur für die neuen Technologien (teilweise) erst etabliert werden muss und anfänglich relativ wenige Fahrzeuge die nötige Infrastruktur nutzen. Da sich mit steigender Nutzungsintensität der relative Beitrag der Infrastruktur zur Ökobilanz verringert, muss erörtert werden, wie mit dieser Frage umgegangen wird. Eine Möglichkeit ist die Darstellung einer Potenzialanalyse mit dem Betrieb einer größeren Anzahl von Fahrzeugen. In dieser Hinsicht ist auch ein Ausblick aufschlussreich, wie sich der vermehrte Betrieb von BEV oder mit Elektrolyse-Wasserstoff betriebenen FCEV auf die Stromerzeugung auswirken kann.

¹ Als Marginalstrom wird derjenige Strom bezeichnet, der aufgrund einer zusätzlich nachgefragten Strommenge (z. B. aufgrund der Einführung neuer, strombasierter Technologien) zusätzlich bereitgestellt wird. Da er in Deutschland heute in der Regel durch eine höhere Auslastung konventioneller Kraftwerke erzeugt wird, ist er meistens fossiler Natur. Welche Erzeugungstechnologien ihn bereitstellen, wird nach dem Merit-Order-Prinzip über die Grenzgestehungskosten definiert.

iii) Betrieb des Fahrzeugs:

Häufige Synonyme: Nutzungsphase, Tank-to-wheel

Wichtige Kenngrößen: Umwandlungseffizienz, Fahrverhalten/Betriebsmodi, zeitlicher und geografischer Bezug, Ladeverluste, Wartungsaufwand (insbes. Batterieersatz), Lebenslaufleistung

Ausschlaggebend für die ökobilanziellen Auswirkungen der Nutzungsphase ist vor allem die Effizienz der Energieumwandlung, d. h. wieviel Kraftstoff oder Strom je gefahrenem Kilometer benötigt wird. Es ist daher absolut notwendig, dass dokumentiert ist, welche Verbrauchsdaten angesetzt wurden (L/100 km, kWh_e/100 km).

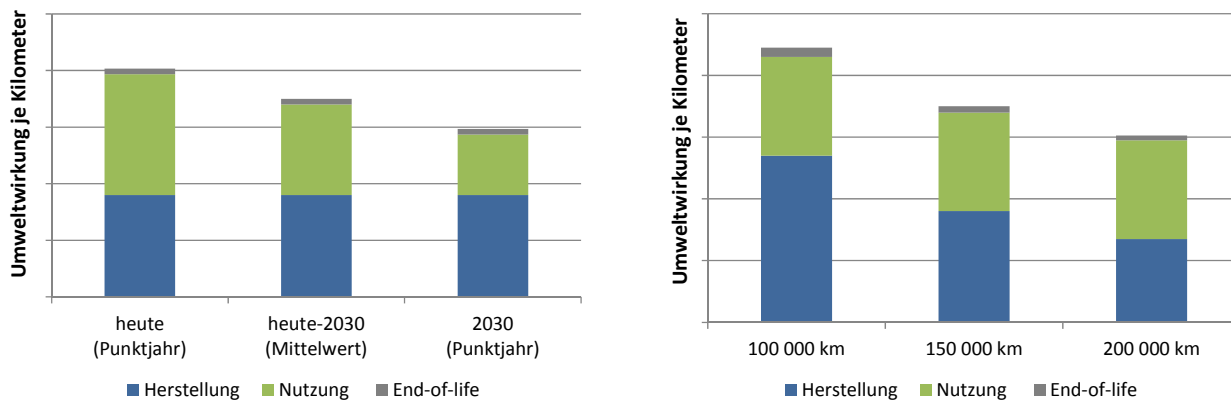
Die **Umwandlungseffizienz** wird einerseits durch interne Parameter beeinflusst, wie Art und Qualität des Antriebs und das Fahrzeugmodell (insbes. Gewicht). Wesentliche externe Parameter sind das Fahrverhalten der Nutzer und der Einsatzbereich (Stadtverkehr, suburbaner Verkehr, Überlandverkehr). Auch geografische Gegebenheiten (z. B. Straßenqualität, Topographie, Klima) haben einen Einfluss. Bei (P)HEV spielt der Grad der Elektrifizierung und in besonderem Maße das Fahrverhalten eine wesentliche Rolle für die Verteilung der Nutzung zwischen Strom und flüssigem Kraftstoff.

***Beispiel Stromverbrauch geografischer Bezug:** In BEV erhöht sich der Energiebedarf in kälteren Gebieten, da für das Heizen des Innenraumes nicht die Abwärme des Verbrennungsmotors genutzt werden kann, sondern Strom eingesetzt werden muss. Unter anderen klimatischen Bedingungen können niedrigere Werte gelten.*

Im Rahmen vorgegebener Fahrzyklen (neuerdings nach WLTP) ermittelte Verbräuche standardisieren die externen Effekte, weichen jedoch teilweise erheblich von den Werten aus dem realen Einsatz der Fahrzeuge ab. Aus ökobilanzieller Sicht sollte daher den Daten aus dem Realbetrieb der Vorzug gegeben werden und die unterstellten Rahmenbedingungen dokumentiert sein.

Der zeitliche Bezugsraum ist wichtig, da davon ausgegangen wird, dass zukünftig noch Effizienzsteigerungen erreicht werden können. Bei BEV und FCEV kann sich die Vorkette des eingesetzten Stroms mit der Zeit deutlich verändern (s. ii)). Daher muss passend zu Ziel und Umfang der Studie klar festgelegt sein, ob der Energiebezug auf ein Punktjahr gerechnet wird oder ob (und ggf. wie) über die Gesamtlebensdauer der betrachteten Fahrzeuge gemittelt wird (vgl. Abbildung 3-1 a)). Während beim Tanken von flüssigen Kraftstoffen die Verluste vernachlässigbar sind, müssen beim Laden von BEV zudem Ladeverluste angesetzt werden.

Abbildung 3-1: Veranschaulichung des Einflusses der Art der Berechnung des Strombezugs und der angesetzten Lebenslaufleistung auf das Ergebnis der Gesamtbilanz (fiktives Schema)



a) Einfluss dynamischer Strombezug

b) Einfluss der Lebenslaufleistung

Zudem müssen in einer vollständigen Bilanz die Aufwände für die **Wartung** Berücksichtigung finden. Insbesondere falls ein Austausch ergebnisbestimmender Komponenten (v. a. der Batterie) vorgesehen ist, sollte dies gut begründet sein.

Emissionen entstehen in der Nutzungsphase vor allem bei den ICEV und (P)HEV durch die Verbrennung flüssiger Kraftstoffe. Bei allen Fahrzeugen sind zudem Partikelemissionen durch Reifen- und Bremsabrieb zu berücksichtigen.

Neben der Lebensdauer in Jahren ist die in der Nutzungsphase geleistete Fahrleistung (**Lebenslaufleistung in km**) eine wesentliche Kenngröße. In der gesamtbilanziellen Darstellung je gefahrenem Kilometer wirkt sie sich vor allem auf den relativen Beitrag von Produktion und Verwertung aus, da diese einmaligen Ereignisse umso weniger ins Gewicht fallen, je länger dasselbe Fahrzeug fährt (siehe Abbildung 3-1 b).

iv) Lebensende des Fahrzeugs:

Häufige Synonyme: End-of-life (EoL), Nachgebrauchsphase

Wichtige Kenngrößen: Recycling, Nachnutzung der Batterie (Battery second life)

Am Ende der Nutzungsphase wird das Fahrzeug entsorgt. Neben der Entsorgung bedenklicher Stoffe erfolgt dabei vor allem ein **Recycling** der wertvollen Materialien, das in der Ökobilanz der Fahrzeuge als Gutschrift angerechnet werden kann. Ausschlaggebend für den Nutzen sind dabei vor allem die Rückgewinnungsquoten der einzelnen Sekundärmaterialien. Die getroffenen Annahmen müssen daher nachvollziehbar und begründet sein. Bei den Technologiemetallen, die in BEV und FCEV zum Einsatz kommen, ist die Recyclinginfrastruktur heute teilweise erst im Aufbau begriffen und die realen Rückläufe aufgrund der relativ neuen Fahrzeuge noch gering, so dass Recycling bisher nur in geringem Maße stattfindet. Es ist sinnvoll, z. B. im Rahmen von Sensitivitätsanalysen aufzuzeigen, welches Potenzial damit erschlossen werden kann. Im Einklang mit Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie muss auch dargestellt und begründet sein, ob sich die angesetzten Recyclingraten auf den Sekundäranteil des entsprechenden Materials im Markt beziehen, oder auf die Rückführung des Materials in den Material-

kreislauf.

Bei der Bilanzierung z. B. von BEV steht die **Nachnutzung der Batterie** in stationären Anwendungen als weitere Option im Raum, um ihre Lebensdauer bei geringerer Kapazität zu verlängern. Für die ökobilanzielle Bewertung besteht dann die Möglichkeit, einen Teil ihrer Umweltlasten in den zweiten Lebenszyklus zu allokalieren. Da die Umsetzung dieser Option in Hinblick auf logistische, garantierechtliche, normierungs- und sicherheitstechnische Fragen und Details heute jedoch unsicher erscheint, muss so eine Wahl sehr gut begründet und der Effekt der Allokation transparent dargestellt sein.

Allgemeine Empfehlungen:

➤ Aggregationsniveau

Allgemein steigt die Transparenz einer Ökobilanz mit dem Detaillierungsgrad der Modellierung. Je tiefer auf die einzelnen Prozessschritte heruntergebrochen und dies auch in den Ergebnissen dargestellt wird, umso nachvollziehbarer wird die Vorgehensweise bei der Bilanzierung und damit die Möglichkeit zur Bewertung ihrer Repräsentativität. Einschränkend wirkt hier die allgemeine Datenlage: je höher aggregiert die verfügbaren Daten sind, umso höher aggregiert wird das Niveau der Ergebnisse (und auch der Interpretation!) sein. Eine weitere Einschränkung kann sich aus Vertraulichkeitsanforderungen zur Wahrung von Firmeninteressen ergeben. Auch im Interesse der Klarheit der Darstellung wird eine Aggregation der Ergebnisse nötig. Hier besteht die Herausforderung darin, das Aggregationsniveau so zu wählen, dass die wesentlichen Ergebnisse herausgearbeitet werden und die abgeleiteten Schlussfolgerungen gestützt sind.

***Beispiel Aggregationsniveau:** Modellierung der Fahrzeugbatterie als Black Box (es steht ein aggregierter Datensatz zur Verfügung) oder: Modellierung wesentlicher Komponenten der Batterie jeweils als Black Box, das Zusammensetzen der Batterie kann mit Daten zu den einzelnen Schritten detailliert nachgebildet werden.*

➤ Umgang mit Datenunsicherheiten

Die obigen Empfehlungen bezüglich des verantwortungsvollen Umgangs und der transparenten Darstellung der angesetzten Parameter bilden die wesentliche Grundlage für eine nachvollziehbare und damit in ihrer Anwendbarkeit und Übertragbarkeit beurteilbare Ökobilanz. Auch bei sehr verantwortungsvoller Herangehensweise ist es jedoch bei Ökobilanzen aufgrund des globalen Anspruchs und des damit inhärent sehr großen Umfangs im Allgemeinen nicht möglich, alle Aspekte mit sicheren Daten zu hinterlegen, sodass bei der realen Umsetzung u. U. auch auf schwächere Daten zurückgegriffen werden muss. Hier gilt der Grundsatz:

Transparenz bezüglich Datenschwächen ist keine Schwäche!

Im Gegenteil muss man denjenigen Ökobilanzen skeptisch gegenüber stehen, die keine Datenunsicherheiten darstellen. Wesentlich ist, dass unsichere Daten transparent gemacht werden und erörtert wird, ob davon auszugehen ist, dass sie einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Dies geschieht durch Analyse der ergebnisbestimmenden, „signifikanten“ Parameter (s. Kapitel 2). Der Einfluss des Parameters kann dann durch geeignete Sensitivitäts-

analysen transparent gemacht werden.

➤ **Umgang mit vertraulichen Daten**

In manchen Fällen können Daten nur unter der Bedingung der strikten Vertraulichkeit von industriellen Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Die Verwendung solcher Daten in Ökobilanzen ist selbstverständlich zulässig. Bei der Dokumentation muss darauf hingewiesen werden, an welchen Stellen mit vertraulichen Daten gearbeitet wurde. Für die weitergehende Transparenz sind Formulierungen hilfreich, die eine Einordnung der auf ihrer Basis generierten Ergebnisse zulassen (bspw. vertrauliche Daten von „Hersteller XY“ oder „eines deutschen/europäischen Herstellers“). Unter Umständen ist es auch möglich, eine Bandbreite anzugeben, in der sich der verwendete Wert bewegt.

4. Resümee und Ausblick

Aussagen, die auf Ökobilanzergebnissen basieren, müssen in ihrer Tragweite und Eindeutigkeit grundsätzlich mit einer angemessenen methodischen Qualität und Datengüte der Arbeit korrespondieren. Hinsichtlich der methodischen Anforderungen geben die einschlägigen Normen umfassende Orientierung zur Erstellung qualitativ guter Ökobilanzen. Auf der Datenseite sind wichtige Schlüsselkriterien zu erfüllen. Es ist ausreichend darzulegen, welche Annahmen für die vergleichende Ökobilanz getroffen worden sind, wie z. B. der angesetzter PKW-Typ, die Lebenslaufleistung des PKW inkl. des Antriebssystems oder die geografische und zeitliche Repräsentativität und der Bezugsraum der Eingangsdaten.

Industrielle Wertschöpfungsketten unterliegen dynamischen Veränderungen, dies betrifft nicht zuletzt auch ihre ökologischen Auswirkungen. Daher ist es essentiell, das Bezugsjahr wesentlicher Eingangsdaten transparent zu machen. Dies gilt besonders, aber nicht nur, für die Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Batterien. In dieser für den PKW-Bereich noch sehr jungen Zulieferkette hat der „roll-out“ der sogenannten „Gigafactories“ gerade erst eingesetzt – unter permanenter Veränderung der Zusammensetzung der Lithium-Ionen-Batteriezellen. So wird allein die dynamische Verringerung des Kobaltanteils der Batteriezellen bei gleichzeitiger Erhöhung des Nickelanteils nicht ohne Spuren auf Ökobilanzergebnisse bleiben. Unterschiede hinsichtlich der Datengenese von beispielsweise drei Jahren können bereits relevant sein.

Dynamische Veränderungen sind auch hinsichtlich des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien zu erwarten. Im Gegensatz zu den konventionellen Starterbatterien (Blei-Säure-Batterien), die einen über Jahrzehnte bereits großflächig eingespielten Recyclingkreislauf aufweisen, beginnt bei Lithium-Ionen-Batterien dieser Recyclingkreislauf gerade erst zu starten und wird mittelfristig jedoch deutlich anwachsen. Daher gilt auch hier, dass die transparente Information der Bezugsjahre für die Ökobilanz unverzichtbar ist.

Vorrangig ist **Transparenz** hinsichtlich der methodischen Annahmen und der eingesetzten Daten der Schlüssel für eine aussagekräftige Ökobilanz. Den Herausforderungen, die sich durch die dynamischen Entwicklungen ergeben, kann durch das in Ökobilanzen seit langem bewährte Instrument der Sensitivitätsanalysen begegnet werden. Das vorliegende Manual gibt klare Orientierung für die Erstellung vergleichender Ökobilanzen von PKW mit unterschiedlichen Antrieben. Es bietet dadurch zugleich eine Hilfestellung zur Identifikation und Klarstellung missbräuchlicher Verwendung oder einseitiger Interpretationen von Ökobilanzergebnissen durch Dritte.

Dieses Manual ist nicht zuletzt im Sinne und in Übereinstimmung mit der Forderung des Fortschrittsberichts 2018 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE): *Das Thema Nachhaltigkeit wird auch bei der Elektromobilität zunehmend bedeutsam. Die reine Betrachtung des Fahrzeuges reicht hierbei nicht aus; entscheidend für das Ergebnis ist die Definition der Systemgrenzen. Es gilt, die Frage zu beantworten, welche Faktoren für eine profunde Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) zu berücksichtigen und zu bewerten sind. Darauf aufbauend sind mögliche Potenziale und Beiträge zur Verbesserung der Ökobilanz von Elektrofahrzeugen herauszuarbeiten und diese in der weiteren F&E-Förderung sowie der Gestaltung der Rahmenbedingungen der Elektromobilität zu berücksichtigen.*

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery electric vehicle
CML	Centrum voor Milieukunde, Universiteit Leiden
E-Motor	Elektromotor
FCEV	Fuel cell electric vehicle
HEV	Hybrid electric vehicle
ICEV	Internal combustion engine vehicle
LCA	Life cycle assessment (Ökobilanz)
LFP-Kathode	Lithium-Eisenphosphat-Kathode
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
NMC-Kathode	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Kathode
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
ReCiPe	Methode der Wirkungsabschätzung nach 18 Midpoint- sowie 3 Endpoint-Indikatoren
V-Motor	Verbrennungsmotor