



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**

**Fakultät Life Sciences**

**Ökologische Bewertung verbrauchsgerecht eingesetzter Photovoltaik-Energie in  
der Nutzungsphase von Elektromobilen im Flottenbetrieb**

Bachelor-Arbeit

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

**Martin Otto Paul Ramacher**

**1964222**

Hamburg

am 14.06.2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt (HAW Hamburg)

2. Gutachterin: Dr.-Ing. Tina Dettmer (TU Braunschweig)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen- und Fertigungstechnik der TU Braunschweig im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes Fleets Go Green.

## Kurzfassung

Dem Zusammenwirken von Elektromobilität und erneuerbaren Energien kann aufgrund erhöhter Umweltentlastungspotenziale eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Daher ist das Ziel dieser Arbeit eine ökologische Bewertung des zum Beladen einer Flotte von Elektromobilen eingesetzten Stroms aus fossilen und regenerativen Quellen.

Im Rahmen der ökologischen Bewertung des eingesetzten Stroms wurden im Rahmen einer Ökobilanz drei Szenarien zur Deckung des Ladebedarfs in der Nutzungsphase entworfen und miteinander verglichen: Vollständige Strombereitstellung mit dem deutschen Strom-Mix 2012, maximale Nutzung von Photovoltaik-Strom aufgrund des analysierten Nutzungsprofils in Kombination mit dem deutschen Strom-Mix 2012 und die vollständige Strombereitstellung durch Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit einem geeignetem Lithium-Ionen-Speichersystem als Insellösung. Dazu wurden zunächst die Nutzungsdaten einer konventionell betriebenen Flotte am Institut für Werkzeugmaschinen- und Fertigungstechnik der TU Braunschweig analysiert und auf eine Elektromobilflotte übertragen. So konnte eine zeitliche Einordnung von Verbrauch und resultierendem Ladebedarf der Elektrofahrzeuge in den Tagesverlauf stattfinden.

Aus den Ergebnissen der Ökobilanz wird deutlich, dass die Substitution des deutschen Stromgestehungsmix 2012 durch Strom aus Photovoltaik-Anlagen bei einer differenzierten Betrachtung der Umweltwirkungen viele Verbesserungspotenziale bietet. Kritisch stellt sich nur die Kategorie des stratosphärischen Ozon-Abbaus dar, welche durch den Ausbau von Photovoltaik-Anlagen eine Erhöhung erfährt (siehe dazu auch: Jungbluth 2005). Kurzfristig können Umwelteinsparpotenziale durch die Verwendung des maximal nutzbaren Anteils von Solarstrom, welcher auf Basis der Nutzungsprofile erhoben werden muss, erreicht werden. Langfristige Umwelteinsparpotenziale bietet der Einsatz von Photovoltaik-Anlagen mit Li-Ion-Batteriespeichersystemen. Die korrekte Dimensionierung und die Effizienz des eingesetzten Speichersystems sind hierbei entscheidend.

Die Ergebnisse der Ökobilanz der Elektroflotte unterliegen gewissen Einschränkungen. Die Phase der Produktion und die Phase der Entsorgung wurden nur grob modelliert da der Fokus auf der Nutzungsphase liegt. Zudem wurden einige Bauteile, wie die benötigte Ladeinfrastruktur oder die elektronischen Bauteile zur Realisierung eines Speichersystems nicht mit einbezogen. Für eine vergleichende Abschätzung der Umweltwirkungen des bewerteten Elektrofahrzeugs sowie der Aufdeckung einiger Verbesserungspotentiale und Problemfelder kann die Ökobilanz trotz dieser Einschränkungen verwendet werden.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit.....	2
2 Grundlagen.....	4
2.1 Die Energiewende und das Energiekonzept Deutschlands.....	4
2.2 Erneuerbare Energien.....	5
2.3 Photovoltaik-Anlagen.....	8
2.4 Elektromobilität.....	11
2.5 Das Zusammenwirken von Elektromobilität und Photovoltaik.....	14
2.6 Ökobilanzierung.....	18
3 Datenerhebung.....	25
3.1 Datengrundlage der einzuführenden Elektromobilflotte.....	25
3.2 Datengrundlage der konventionell betriebenen Flotte des IWF.....	27
3.3 Definition des Untersuchungsgegenstandes.....	28
3.4 Sachbilanzdatenbank ecoinvent 2.2.....	32
4 Ökobilanz verbrauchsgerecht eingesetzter Photovoltaik-Energie.....	34
4.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen.....	34
4.2 Sachbilanz.....	38
4.3 Wirkungsbilanz.....	46
5 Ergebnisse.....	61
5.1 Auswertung und Interpretation der Ökobilanz.....	61
5.2 Diskussion der Ergebnisse.....	65
6 Fazit & Ausblick.....	68
6.1 Fazit.....	68
6.2 Ausblick.....	69
Literaturverzeichnis.....	71
Anhang.....	78

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bruttostromerzeugung in Deutschland .....	6
Abbildung 2-2: Solarstrahlung in der Erdatmosphäre .....	9
Abbildung 2-3: Tagesprofil einer PV-Anlage, des Verbrauchs und des natürlichen Eigenverbrauchs .....	10
Abbildung 2-4: Eigenverbrauchsoptimierung durch Zwischenspeicherung der PV-Energie .....	10
Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau von BEV und PHEV .....	12
Abbildung 2-6: Projektinhalte Fleets Go Green .....	13
Abbildung 2-7: Prozessschema einer Ökobilanz .....	19
Abbildung 2-8: Aggregationsschritte und -Ergebnisse in der Wirkbilanz .....	22
Abbildung 2-9: Elemente von Petri-Netzen .....	23
Abbildung 2-10: Beispielhaftes Stoffstromnetz mit Elementen der Petri-Netz-Theorie .....	24
Abbildung 3-1: Klimadiagramm Hannover .....	29
Abbildung 3-2: Distanz und Anzahl valider Fahrten der IWF-Flotte nach Fahrzeugen .....	30
Abbildung 3-3: Monatsverlauf für das Fahrzeug BS-TU107 im September 2011 .....	31
Abbildung 3-4: Relative Häufigkeit der möglicher Ladezeiten .....	31
Abbildung 4-1: Zu bewertende Szenarien der Ökobilanz .....	35
Abbildung 4-2: Systemgrenzen der Strombereitstellungsszenarien .....	36
Abbildung 4-3: Struktur des UNIT-Datensatzes "electricity, low voltage, at grid [DE]" .....	40
Abbildung 4-4: Bruttostromerzeugung und Stromimporte in Deutschland im Jahr 2012 .....	41
Abbildung 4-5: Standort der Ladesäule und Position der berechneten Solarstrahlungsdaten .....	42
Abbildung 4-6: Schema zur Ermittlung des PV-Nutzungsgrades .....	44
Abbildung 4-7: Prozesskettenanalyse der Sachbilanz nach Wirkungskategorien .....	47
Abbildung 4-8: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Erschöpfung abiotischer Ressourcen .....	48
Abbildung 4-9: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Boden Ökotoxizität .....	49
Abbildung 4-10: Ergebnisse der Wirkungsbilanz – Aquatische/sedimentäre Seewasser Ökotoxizität ....	50
Abbildung 4-11: Aquatische und sedimentäre Seewasser Ökotoxizität in der Nutzungsphase .....	51
Abbildung 4-12: Ergebnisse der Wirkungsbilanz – Aquatische/sedimentäre Süßwasser Ökotoxizität ....	52
Abbildung 4-13: Aquatische und Sedimentäre Süßwasser Ökotoxizität in der Nutzungsphase .....	53
Abbildung 4-14: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Humantoxizität .....	54
Abbildung 4-15: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Photochemische Oxidation .....	55
Abbildung 4-16: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Stratosphärischer Ozon-Abbau .....	56
Abbildung 4-17: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Treibhauspotenzial .....	57
Abbildung 4-18: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Überdüngungspotenzial .....	58
Abbildung 4-19: Überdüngungspotenzial in der Nutzungsphase .....	58
Abbildung 4-20: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Versauerungspotenzial .....	59

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ausgewählte Ziele der Energiewende.....	5
Tabelle 2-2: Wirkungskategorien der CML-Methode.....	21
Tabelle 3-1: Technische Daten der im FGG-Projekt eingesetzten Elektromobile.....	25
Tabelle 3-2: Reichweite des Mia in unterschiedlichen Fahrzyklen .....	26
Tabelle 4-1: Betrachtete Wirkungskategorien nach CML 2001 .....	37
Tabelle 4-2: Anpassung des Datensatzes "passenger car, electric LiMn2O4, city car, at plant [RER]" .....	39
Tabelle 4-3: Angenommene Transportwege in der Phase Distribution.....	39
Tabelle 4-4: Gesamtstromverbrauch eines Mia MiAmore in der Nutzungsphase .....	40
Tabelle 4-5: Rangfolgenvergleich aller Wirkungskategorien.....	60
Tabelle 5-1: Rangordnung der Wirkungskategorien nach Umweltbundesamt .....	61
Tabelle 5-2: Gewichteter Rangfolgenvergleich der Wirkungskategorien.....	62

## Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis

°C	Grad Celsius
a	Jahr
BEV	Batteriebetriebenes Elektromobil
BMU	Bundesumweltministerium
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BReg	Bundesregierung Deutschland
CML	Institute of Environmental Sciences, Leiden University
D	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien, auch: Erneuerbare-Energien-Gesetz
EN	Europäische Norm
FGG	Fleets Go Green
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
h	Stunde
ICE	Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimafragen
ISO	International Organisation für Normung
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig
KFA	Kraftfahrtbundesamt
Kfz	Kraftfahrzeuge
KKW	Kernkraftwerk
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)
LCI	Sachbilanz (Life Cycle Inventory)
LCIA	Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment)
Li-Ion	Lithium-Ionen
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
Mia	Mia MiAmore
NEE	Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität
PHEV	Plug-In-Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PJ <sub>th</sub>	Petajoule (10 <sup>15</sup> Joule) thermische Energie
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaik-Anlagen
t	Tonne
THG	Treibhausgasemissionen
TSECC	TÜV-Süd E-Car-Cycle
TWh	Terrawattstunden (1 Milliarde kWh)
UBA	Umweltbundesamt
V	Volt
W	Watt
WEA	Windenergieanlagen

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

SONNE BEWEGT – Das Motto des Bundesverbandes Solare Mobilität e.V. erscheint im Rahmen der beschlossenen Energiewende Deutschlands als eine realisierbare Chance einer zukunftsfähigen und postfossilen Mobilität (BSM 2013). Denn getrieben vom Klimawandel sind der Ausstieg aus der fossilen und der vollständige Umbau zu einer regenerativen Energiegewinnung in Deutschland politisch beschlossen (BMU 2012). Dies gilt auch für den Verkehr. Im Jahr 2050 sollen ausschließlich Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren (BMU 2010).

Forschungsprojekte und Kooperationen von Politik, Wissenschaft und Wirtschaft treiben die Ziele der Energiewende voran und ebnen den Weg in eine umweltschonendere Zukunft. Umweltschonender deshalb, weil Elektromobile im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren effizienter sind und in Kombination mit dem Ausbau erneuerbarer Energien enorme Umweltentlastungspotenziale bieten (Althaus et al. 2010). Der in der Nutzungsphase von Elektromobilen eingesetzte Strom aus regenerativen Quellen birgt enorme Umweltentlastungspotenziale im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Potenziale, welche die Umweltwirkungen der zur Produktion der Fahrzeuge und vor allem zur Produktion der Batterien eingesetzten Rohstoffe aufwiegen. Würde man Strom aus Kohlekraftwerken verwenden um die Batterien von Elektromobilen zu füllen, so gäbe es lediglich eine zeitliche und örtliche Verlagerung der Umweltwirkungen weg vom Fahrzeug, hin zur Stromproduktion. Und dennoch wäre das Elektromobil in den meisten Fällen umweltschonender zu bewerten als ein konventionell betriebenes Fahrzeug (Althaus et al.). Unter Verwendung von regenerativen Energien, wie beispielsweise Solarstrom, wäre der Strom weitgehend emissionsfrei. Der Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. beschreibt die Beziehung von erneuerbaren Energien und der Elektromobilität sogar als „natürliche Partner“ (BEE 2010, S. 4): Mehr Strom aus erneuerbaren Energien bedeute eine klimafreundlichere Mobilität - und mehr Elektromobilität schaffe eine bessere Integration von Strom aus erneuerbaren Energien.

Aber auch beim Einsatz von regenerativen Energien kommt es bei der Bewertung der Umweltwirkungen darauf an, wie die Systeme zur Strombereitstellung hergestellt wurden, woraus sie bestehen und wie sie eingesetzt werden. Das Ziel bei einer Reduzierung der Umweltwirkungen sollte nicht bemessen sein an den Umweltwirkungen fossiler Strombereitstellungssysteme; das Ziel sollte die möglichst niedrige Umweltwirkung sein - das umweltschonendste System.

Photovoltaik-Anlagen-Systeme zur Solarstromerzeugung sind beispielsweise leicht zu installieren und in bestehende Strukturen zu integrieren, sie sind weitläufig erhältlich und arbeiten emissionsfrei. Doch bei einer Bewertung der Umweltwirkungen dieser Systeme kommt es maßgeblich auf die eingesetzten Materialien und deren ökologischen Rucksack an. Auch spielt der Einsatz, die Wahl des Anlagen-Systems, eine wichtige Rolle. Betreiber eines netzgekoppelten Photovoltaik-Anlagen-Systems zum Beladen der Batterie eines Elektrofahrzeugs müssen die Umweltwirkung der eingesetzten Photovoltaik-Anlage berücksichtigen, wenn der eingesetzte Strom ökologisch bewertet werden soll. Außerdem hat dieses System den Nachteil, dass ein Nutzerverhalten dem Lauf der Sonne angepasst werden muss um das Fahrzeug ausschließlich solar laden zu können. Eine andere Systemlösung ist eine Photovoltaik-Anlage kombiniert mit einem Speicher, welcher auch zeitversetzt Solarstrom bieten kann, wenn die Sonne bereits untergegangen ist. Jedoch ist hier die Produktion des Speichersystems mit in die ökologische Bewertung einzubeziehen. Hier stellt sich also die Frage: Welches der beiden Systeme hat den besseren ökologischen Fußabdruck? Und wie groß ist der Unterschied dieser Systeme im Vergleich zum herkömmlichen Bezug von "Strom aus der Steckdose" zum Laden eines Elektromobils? Diese Fragen gilt es in dieser Arbeit zu klären, welche Teil des vom BMU geförderten Projektes Fleets Go Green ist.

## 1.2 Aufgabenstellung und Struktur der Arbeit

Diese Arbeit hat das Ziel zwei verschiedene Möglichkeiten der verbrauchsgerechten Nutzung von Solarstrom im Vergleich zu Strom aus nicht regenerativen Quellen für das Beladen eines Elektrofahrzeuges im Flottenbetrieb ökologisch zu bewerten und das umweltschonendste System zu identifizieren. Es gilt dabei folgende Fragen zu klären:

- Wie hoch sind die Umwelteinflüsse von, in der Nutzungsphase von Elektromobilen zum Beladen der Fahrzeugbatterie eingesetztem, Strom mit einer Zusammensetzung des deutschen Stromgestehungsmix<sup>1</sup> im Jahr 2012?
- Wie hoch ist das Umweltentlastungspotenzial, wenn der in der Nutzungsphase von Elektromobilen benötigte Strom zum Beladen der Fahrzeugbatterie stattdessen aus Photovoltaik-Anlagen-Systemen stammt?
- Welches Photovoltaik-Anlagen-System hat die geringeren Umweltwirkungen? Eine netzgekoppelte Anlage ohne Lademanagement oder eine autarke Anlage mit einem zusätzlichen Stromspeicher?
- Gibt es Potenziale die bestehenden Umweltwirkungen der unterschiedlichen Photovoltaik-Anlagen-Systeme zu verringern?
- Welches Photovoltaik-Anlagen-System arbeitet langfristig am umweltfreundlichsten?

---

<sup>1</sup> Auch Stromkennzeichnung oder Strom-Mix: Die prozentuelle Aufteilung der Energieträger, aus denen in einem Zeitraum von einem Jahr Strom erzeugt und an Verbraucher verkauft wird.



Zur Klärung dieser Fragen, ist diese Arbeit in mehrere Teile gegliedert. In den Grundlagen (Kapitel 2), soll zunächst ein grundlegendes Verständnis für die eingesetzten Technologien – Elektromobilität und Photovoltaik – und deren Potenziale zur Entlastung der Umwelt geschaffen werden. Desweiteren wird die Methode Ökobilanz zur ökologischen Bewertung von Produktsystemen erläutert.

Anschließend findet in Kapitel 3, der Datenerhebung, die Definition eines Untersuchungsgegenstandes statt. Das zu bewertende Elektrofahrzeug ist ein Mia MiAmore, welcher am Institut für Werkzeugmaschinen- und Fertigungstechnik der TU Braunschweig (IWF) als betriebliches Flottenfahrzeug eingesetzt werden soll und die bestehende konventionell betriebene Fahrzeugflotte ablösen wird. Da zum jetzigen Zeitpunkt keine gemessenen Nutzungsdaten für den Mia MiAmore im Flotteneinsatz am IWF vorliegen, wird mit Hilfe der technischen Daten des Herstellers und den vorliegenden Nutzungsdaten der konventionell betriebenen Fahrzeugflotte des IWF ein Nutzungsprofil für den Mia erhoben. Diese Erhebung bildet die Grundlage für Kapitel 4 der Arbeit: die ökologische Bewertung.

Mit der Ökobilanz in Kapitel 4 soll eine Bewertung der Umwelteinflüsse erfolgen, welche einhergehen mit der Produktion, Nutzung und Entsorgung eines Elektrofahrzeugs vom Typ Mia MiAmore gemäß dem definierten Untersuchungsgegenstand in Kapitel 3. Der Fokus der Ökobilanz liegt hierbei auf dem Vergleich von verschiedenen Möglichkeiten zur Bereitstellung von Strom in der Nutzung des Fahrzeugs. Entweder wird das Elektrofahrzeug in der Nutzungsphase vollständig mit dem normalen Stromgestehungsmix in Deutschland im Jahr 2012 geladen oder mit Solarstrom, welcher ebenfalls unterschiedlich bereitgestellt wird. Eine nutzungsgerechte Berücksichtigung von Solarstrom ist die erste betrachtete Variante. Dazu wird zunächst aus den in Kapitel 3 ermittelten Nutzungsprofilen ermittelt, wie viel Sonnenstrom eine Elektroflotte zum Laden nutzen könnte, wenn sie nach jeder Fahrt direkt beladen werden würde (ohne Lademanagement). Die so ermittelte nutzbare Menge Solarstrom soll durch Photovoltaik-Anlagen bereitgestellt werden und der restliche Strombedarf wird vom deutschen Strombedarf gedeckt. Die zweite Variante zur Nutzung von Solarstrom ist der Betrieb eines Inselsystems mit einem geeigneten Stromspeicher und damit die ausschließliche Nutzung von Solarstrom zum Beladen eines Elektromobils.

Mithilfe der Ergebnisse der Ökobilanz kann im Kapitel 5, den Ergebnissen, eine Aussage über die betrachteten ökologischen Wirkungen, welche die unterschiedlichen Möglichkeiten der Strombereitstellung mit sich bringen, getroffen und das umweltfreundlichste System zur Solar-Strombereitstellung identifiziert werden. Diese Ergebnisse werden daraufhin diskutiert.

In Kapitel 6 wird ein Fazit gezogen und abschließend wird ein Ausblick gewährt.

## 2 Grundlagen

In diesem Teil der Arbeit wird zunächst auf die Rolle der deutschen Energiepolitik als wichtigem Treiber für den Ausbau von Elektromobilität und erneuerbaren Energien eingegangen. Die Themenfelder Elektromobilität und erneuerbare Energien - im speziellen Photovoltaik-Anlagen - werden daraufhin in ihren Grundlagen und im Kontext dieser Arbeit erläutert. Desweiteren wird das Zusammenwirken beider Themenfelder als Grundlage für die Betrachtung der folgenden Kapitel der Arbeit kurz dargestellt. Anschließend wird die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044 als eine Methode zur ökologischen Bewertung von Produktsystemen eingeführt.

### 2.1 Die Energiewende und das Energiekonzept Deutschlands

"Der Klimawandel findet statt – weltweit, in Europa und nicht zuletzt auch in Deutschland" (BMU 2010, S. 9). Mit diesen einleitenden Worten wird der Leser in einer Publikation des Bundesumweltministeriums empfangen und vorbereitet auf das Ziel der deutschen Energiepolitik bis 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energien. Das BMU stützt sich bei dieser Zielsetzung auf die im Jahr 2007 vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimafragen (IPCC) zusammengetragenen wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Klimawandel. Der IPCC identifiziert Treibhausgasemissionen (THG) als die treibende Kraft der fortschreitenden Klimaerwärmung und prognostiziert bei einer Erwärmung um zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter globale und regionale Klimafolgen (IPCC 2007). Unter Berücksichtigung der vom IPCC maximal vertretbaren Zwei-Grad-Grenze muss das Niveau anthropogener THG bis 2050 weltweit halbiert werden, um schwerwiegende Klimafolgen zu verhindern. Auch Deutschland und die Europäische Union erkennen das Zwei-Grad-Ziel unter anderem mit der Kopenhagen-Vereinbarung von 2009 politisch an (BMWi 2013).

In Deutschland wurde der Energiesektor mit mehr als 80% der deutschen THG als einflussreichster Sektor identifiziert (BMWi 2012). Das Energiekonzept der Bundesregierung im September 2010 und die energiepolitischen Beschlüsse im Juni 2011 setzen hier an und zielen auf eine Umstrukturierung der Energieversorgung "[...] zu einem hocheffizienten und erneuerbaren Energiesystem" (BMU 2012, S. 10). Das übergeordnete Ziel dieser Politik ist die Reduzierung von THG um 80-90%. (BMWi 2013). Konkrete Ziele nach dem Bundesumweltministerium (BMU 2010) sind:

- Der Ausstieg aus der Kernenergienutzung bis spätestens 2022.
- Der Ausbau und die Modernisierung der Stromnetze.
- Die Steigerung der Energieeffizienz (Stromverbrauch, Gebäude, Mobilität).
- Der Ausbau von erneuerbaren Energien aller Arten.

Tabelle 2-1 zeigt eine Auswahl quantitativer Ziele der Energiewende in Deutschland (D). Die Reduzierung der THG um bis zu 95% bis 2050 kann dabei weiterhin als das übergeordnete Ziel verstanden werden. Im Verkehrsbereich soll durch alternative und effizientere Antriebstechnologien eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs um 40 Prozent gegenüber 2005 bewirkt werden. Mit einher geht die Einführung von sechs Millionen Elektrofahrzeugen bis 2030. Das anvisierte Ziel für den Ausbau erneuerbarer Energieträger beträgt mindestens 80% des Anteils am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050.

*Tabelle 2-1: Ausgewählte Ziele der Energiewende nach BMWi (2012)*

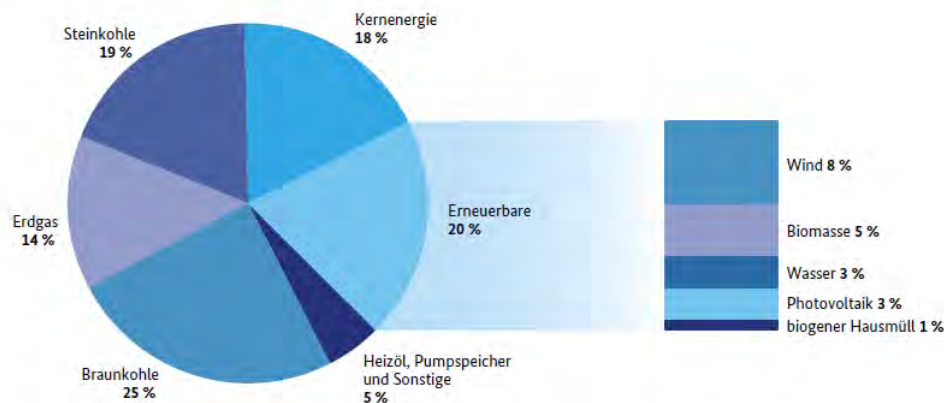
	2011	2020	2030	2040	2050
<b>Treibhausgasemissionen</b>					
Treibhausgase (1990)	-26,4%	-40%	-55%	-70%	bis -95%
<b>Verkehrsbereich</b>					
Endenergieverbrauch (2005)	-0,5%	-10%			- 40%
Anzahl Elektrofahrzeuge	ca. 6600	1 Mio.	6 Mio.	-	-
<b>Anteil Erneuerbarer Energien</b>					
am Bruttostromverbrauch	20,3%	mind. 35%	mind. 50%	mind. 65%	mind. 80%
am Bruttoendenergieverbrauch	12,1%	18%	30%	45%	60%

Wie diese Ziele umgesetzt werden sollen, welche Umweltentlastungspotenziale sie beinhalten können und wie die Ziele der Energiewende ineinandergreifen, soll in den folgenden Kapiteln für die Themenbereiche erneuerbare Energien im Allgemeinen und Photovoltaik (PV) im Besonderen sowie Elektromobilität erläutert werden.

## 2.2 Erneuerbare Energien

Bis 2050 sollen erneuerbare Energien mindestens 80% des Bruttostromverbrauchs Deutschlands abdecken. Dieser Wandel ist notwendig um das Emissionsziel deutscher Politik bis 2050 zu realisieren. Desweiteren wurde nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima die Entscheidung getroffen, spätestens 2022 das letzte Kernkraftwerk (KKW) vom Netz zu nehmen. Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll hier einen großen Teil dazu beitragen, die fehlende Kapazität der abgeschalteten KKW aufzufangen. Im Jahr 2011 erreichte der Beitrag der erneuerbaren Energien erstmals 20% (vgl. Abb. 2-3) und damit 123,2 TWh (BmWi 2012) an der Bruttostromerzeugung in D. Der überwiegende Teil des deutschen Stromgestehungsmix bestand im Jahr 2011 aus fossilen Energieträgern, wie Braunkohle (25%), Steinkohle (19%) und Erdgas (14%); die Kernenergie leistete einen Beitrag von 18% (vgl. Destatis 2013).

Bruttostromerzeugung in Deutschland 2011 (612 TWh)\*



\* Vorläufige Angaben (Stand 14.12.2011), z. T. geschätzt. Abweichungen in den Summen durch Rundungen.

Quellen: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB), Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW)

Abbildung 2-1: Bruttostromerzeugung in Deutschland, Quelle: BMWi (2012)

Aber was versteht man überhaupt unter erneuerbaren Energien? Nach Kaltschmitt et al. 2003 (Kaltschmitt et al. 2003) handelt es sich bei erneuerbaren Energien um Primärenergien, die – gemessen an menschlichen Dimensionen – als unversieglich angesehen werden können. Die Begriffsbestimmungen in § 3 des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) definieren erneuerbare Energien wie folgt: "Erneuerbare Energien sind Wasserkraft einschließlich der Wellen-, Gezeiten-, Salzgradienten- und Strömungsenergie, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Geothermie, Energie aus Biomasse einschließlich Biogas, Deponiegas und Klärgas sowie aus dem biologisch abbaubaren Anteil von Abfällen aus Haushalten und Industrie." (BMU 2004, S. 2) Erneuerbare Energien können je nach eingesetzter Nutzungstechnologie zur Strom- und Wärmeerzeugung oder in Form von Biokraftstoffen genutzt werden. Es folgen kurze Steckbriefe der an der Stromerzeugung beteiligten erneuerbaren Energien nach Quaschnig (2007), sortiert nach ihren technologisch-ökologischen Ertrags-Potenzialen in Deutschland im Jahr 2050 nach BMU (2010):

**Windenergie** – Windenergieanlagen (WEA) nutzen die Bewegungsenergie des Windes. Diese verursacht bei nach dem Auftriebsprinzip konstruierten WEA an den Flügeln einen Auftrieb und versetzt diesen dadurch in Rotation. Die Rotationsenergie wird über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt und ins Netz eingespeist. WEA nahmen im Jahr 2012 einen Anteil von 8% an der deutschen Bruttostromerzeugung ein. Für die Windkraft besteht bis zum Jahr 2050 ein technologisch-ökologisches Potential von 360 TWh/a.

**Photovoltaik** – Photovoltaik-Anlagen (PVA) wandeln mit Hilfe von Solarzellen das Sonnenlicht auf Basis des photoelektrischen Effektes in elektrische Energie um. Eine tiefergehende Betrachtung von PVA erfolgt in Kapitel 2.2.3. PVA nahmen im Jahr 2012 einen Anteil von 4,5% an der deutschen Bruttostromerzeugung ein. Für PVA besteht bis zum Jahr 2050 ein technologisch-ökologisches Potenzial von 284 TWh/a.

**Geothermie** – Die in der Erde gespeicherte Wärmeenergie kann genutzt werden um Wasser oder organische Medien zu verdampfen, um mit dem Dampf Turbinen anzutreiben, welche Strom erzeugen. Der derzeitige Anteil an der deutschen Bruttostromerzeugung ist marginal. Mit einem technologisch-ökologischen Potenzial bis zum Jahr 2050 von 50 TWh/a ist die Energieerzeugung aus Geothermie eine zu berücksichtigende erneuerbare Energiequelle.

**Biomasse** – Eine effiziente Nutzung von Biomasse stellt deren Verbrennung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen dar. Die eingesetzten Rohstoffe sind dabei sehr unterschiedlich und reichen von gezielt angebauten Energiepflanzen bis hin zu Stoffen tierischer Herkunft. Die elektrische Energie aus verbrannter Biomasse nahm im Jahr 2012 einen Anteil von 5,8% an der deutschen Bruttostromerzeugung ein. Für die Erzeugung von Strom aus der Verbrennung von Biomasse besteht (basierend auf Abfallbiomasse) bis zum Jahr 2050 ein technologisch-ökologisches Potenzial von 583 PJ<sub>th</sub>/a – der Energiegehalt kann je nach Effizienz der Umwandlungsprozesse zu einem bestimmten Anteil in elektrische Energie umgewandelt werden.

**Biogas** – Eine wirksame Verstromung von Biogas erfolgt üblicherweise durch dessen Verbrennung in Blockheizkraftwerken. Biogas entsteht bei der Zersetzung organischer Materie durch Methanbakterien (Vergärung). Die Energie aus Biogas nahm im Jahr 2011 einen Anteil von 3,2% an der deutschen Bruttostromerzeugung ein. Für die Erzeugung von Strom aus in Verbrennungsprozessen eingesetztem Biogas besteht bis zum Jahr 2050 ein technologisch-ökologisches Potenzial von 143 PJ<sub>th</sub>/a. Der Energiegehalt kann je nach Effizienz der Umwandlungsprozesse zu einem bestimmten Anteil in elektrische Energie umgewandelt werden – für die ausschließliche Verwendung von Biogas aus Abfallbiomasse zur Erzeugung von Strom ist ein technologisch-ökologisches Potenzial von 23 TWh/a zu erwarten.

**Wasserkraft** – Wasserkraftwerke, in den meisten Fällen Speicherkraftwerke oder Laufwasserkraftwerke, nutzen die kinetische und potentielle Energie des Wasser und wandeln diese über Generatoren in elektrische Energie um. Wasserkraftwerke nahmen im Jahr 2012 einen Anteil von 3,4% der deutschen Bruttostromerzeugung ein. Für die Wasserkraft besteht bis zum Jahr 2050 ein technologisch-ökologisches Potenzial von 24 TWh/a.

Aus den Steckbriefen ergeben sich insgesamt 705 TWh/a technologisch-ökologisches Potential für erneuerbare Energien zur Bruttostromerzeugung. Der prognostizierte

Stromverbrauch für D liegt im Jahr 2050 bei 506 TWh/a<sup>2</sup>. Auf Basis dieser Zahlen hält die Bundesregierung (BReg) den Energiewandel bis 2050 für realisierbar. Die wichtigste gesetzliche Grundlage für die Realisierung des Energiewandels in Deutschland ist das EEG von 2004. Unterstützend bei der Einführung erneuerbarer Energiesysteme wirken zusätzlich Förderungen im Bereich Forschung und Entwicklung (BMU 2004). Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen beispielhaft ein Teilergebnis im Rahmen des vom BMU geförderten Projektes Fleets Go Green (FGG) dar, welches in Kapitel 2.4.1 weiter erläutert werden soll.

Da in dieser Arbeit eine Betrachtung des ökologischen Entlastungspotenzials durch das Zusammenwirken von Elektromobil-Flotten und regenerativer Energie aus Photovoltaik-Anlagen erfolgen soll, wird dieses Themenfeld im Folgenden näher erläutert.

### 2.3 Photovoltaik-Anlagen

Für eine ökologische Bewertung von Strom aus Photovoltaik-Anlagen ist die grundlegende Funktionsweise und Wissen über die wichtigsten Komponenten von PVA notwendig. Die für diese Arbeit relevanten Themenbereiche werden daher in diesem Kapitel kurz betrachtet.

Durch ständig ablaufende Kernfusionsprozesse im Inneren der Sonne, wird Energie freigesetzt, welche den oberen Rand der Erdatmosphäre zum größten Teil als elektromagnetische Strahlung erreicht (Mertens 2013). Diese Strahlung beträgt dort im Mittel etwa 1367 W/m<sup>2</sup> (Solarkonstante) und schwankt im Verlauf der Jahreszeiten aufgrund der elliptischen Umlaufbahn der Erde um die Sonne und der um 23,5° geneigten Erdachse (Watter 2009). Hamburg liegt beispielsweise auf 53,5° nördlicher Breite und damit steht die Sonne am Sommeranfang mit 60° über dem Horizont, während es im Winter nur 13° sind. Die einfallende Strahlung fällt im Winter flacher ein und mit dem längeren Weg durch die Atmosphäre erfährt die Sonnenstrahlung eine stärkere Schwächung (Watter 2009).

Photovoltaik ist die Technik der direkten Umsetzung, von dem auf der Erde eintreffenden und nutzbaren Anteil der Sonnenstrahlung, in Strom durch Solarmodule (Quaschnig 2007). Dabei unterscheidet man die einfallende Strahlung in Direktstrahlung und Diffusstrahlung, deren Summe die Globalstrahlung ist (vgl. Abb. 2-2). Für die technische Nutzung ist primär der Direktstrahlungsanteil ausschlaggebend (Watter 2009), welcher auf ein Solarmodul trifft. Es bedarf in der Praxis immer eines Kompromisses zwischen dem optimalen Einfallswinkel der Direktstrahlung im Sommer und derer im Winter, da mit dem längeren Weg der Strahlung durch die Atmosphäre der Direktstrahlungsanteil sinkt (Mertens 2013). Rechnerisch erhält man in Deutschland den größten Solar-Ertrag, wenn man die Photovoltaik-Module in einem Aufstellwinkel von etwa 30° genau Richtung Süden ausrichtet (geringster Einstrahlungs- und

---

<sup>2</sup> Die Elektrifizierung des Verkehrs wurde bei den Prognosen berücksichtigt.

Reflektionsverlust) (Quaschnig 2007). Voraussetzung dafür ist, dass es keine Verschattungen des Moduls durch Gebäude, Bäume, etc. gibt.

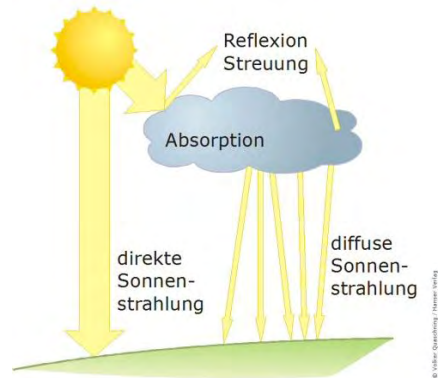


Abbildung 2-2: Solarstrahlung in der Erdatmosphäre, Quelle: Quaschnig (2007)

Die Umwandlung der eintreffenden Sonneneinstrahlung geschieht im Solarmodul durch Solarzellen, welche aus halbleitenden Materialien bestehen. Diese Halbleiter-Materialien sind in der Photovoltaik von entscheidender Bedeutung, da sie die ideale Voraussetzung für die Realisierung des inneren Photoeffektes bieten, welcher die Anregung von Elektronen durch Photonen formuliert (Quaschnig 2007). In einer Solarzelle herrscht materialbedingt immer eine Diffusionsspannung, welche sich durch die Ansammlung von Elektronen zu einer nutzbaren Zellspannung einstellt (Mertens 2013). Je mehr Photonen in eine Solarzelle aus Halbleiter-Materialien eindringen, desto mehr Elektronen können fließen und desto höher ist die Stromstärke. Mit dem Elektronenfluss stellt sich eine konstante Zellspannung (Gleichspannung) ein und es ergibt sich ein linearer Zusammenhang aus elektrischer Leistung und Direktstrahlung der Sonne für die Solarzelle (Mertens 2013).

Mehrere miteinander verschaltete Solarzellen nennt man ein Solarmodul. Es kommen diverse Halbleiter-Materialien und Zellentechnologien in heutigen Solarmodulen zum Einsatz, deren Wirkungsgrad in Abhängigkeit von vielen Faktoren schwanken kann. Im praktischen Einsatz haben Solarmodule einen Wirkungsgrad zwischen 10 und 19% (Watter 2009). Die Verschaltung von Solarmodulen in Kombination mit einem Spannungswandler bezeichnet man als Photovoltaik-Anlage (Quaschnig 2007). Diese können z.B. in Form von großen Solarparks auf Freiflächen, als Flach- oder Schrägdachanlagen auf Gebäuden oder als Fassadenanlagen auf Gebäuden installiert werden. Man unterscheidet dabei verschiedene System-Varianten.



Eine Variante sind netzgekoppelte PVA. Die Anlagen speisen den erzeugten Strom direkt in das Energieversorgungsnetz ein, wo dieser bevorzugt und direkt verbraucht wird. Der gesamte Solarstrom wird in das Netz gespeist und gemäß dem EEG vergütet, während der Verbrauch der Anlagenbetreiber über Strom aus dem Netz gedeckt wird (Mertens 2013). Mittlerweile gibt es einen Trend in Richtung netzgekoppelter Anlagen mit vorrangigem Eigenverbrauch, da mit der Neufassung des EEG in 2009 erstmals ein wirtschaftlicher Anreiz zur Steigerung des Eigenverbrauchs von PV-Strom geschaffen wurde (Braun und Landau 2011). Wann immer Solarstrom zur Verfügung steht und ein Verbraucher vor Ort diesen nutzen kann, wird direkt genutzt (vgl. Abb. 2-3). Steht kein Verbraucher zur Nutzung des Solarstroms bereit, wird dieser ins Netz gespeist. Steht kein Solarstrom zur Verfügung, wird Strom aus dem Netz bezogen. (Mertens 2013).

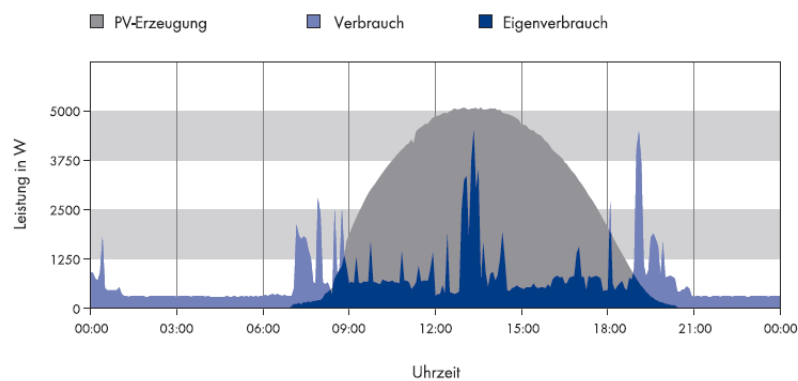


Abbildung 2-3: Tagesprofil einer PVA, des Verbrauchs und des natürlichen Eigenverbrauchs, Quelle: SMA (2013)

Eine andere System-Variante ist die Integration eines Stromspeichers in ein netzgekoppeltes System. Der Stromspeicher in Form einer Batterie ist in der Lage, erzeugten aber nicht verbrauchten Solarstrom zu speichern um ihn z.B. in der Nacht zu nutzen und um damit den Eigenverbrauch der PVA zu erhöhen (vgl. Abb. 2.4). Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs entlastet gleichzeitig auch regionale Mittel- und Niederspannungsnetze und wirkt dadurch netzunterstützend bis der Umbau zu einem modernen Verbundnetz, das schwankende Energiemengen verlustarm verteilen kann, abgeschlossen ist (Bost et al. 2011).

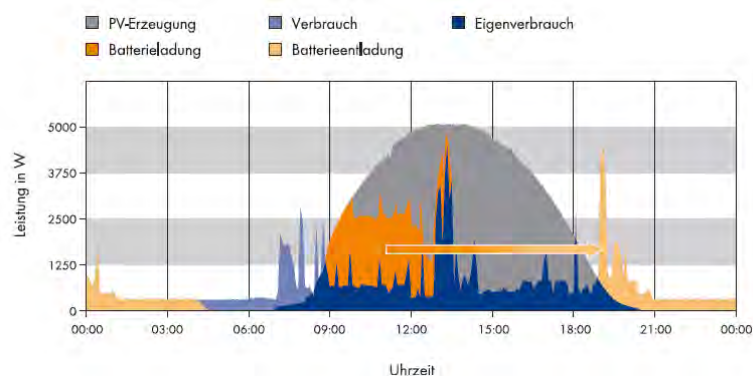


Abbildung 2-4: Eigenverbrauchsoptimierung durch Zwischenspeicherung der PV-Energie, Quelle: (SMA 2013)



Eine weitere Variante von PVA, sind Inselsysteme. Inselsysteme werden in Kombination mit einer geeigneten Batterie auf den autarken Bedarf eines Verbrauchers ohne Netzanschluss dimensioniert (Quaschnig 2007). Der erzeugte Strom wird entweder direkt verbraucht oder in die Batterie gespeichert. Steht kein direkter Solarstrom bereit, kann der in der Batterie gespeicherte Solarstrom genutzt werden bis dieser aufgebraucht ist.

Der Einsatz von Solarstromerzeugung mit Eigenverbrauchsanteil und als Insellösung sollen in dieser Arbeit in Kombination mit einer Elektromobilflotte untersucht werden. Im folgenden Kapitel erfolgt daher eine Einführung in das Thema Elektromobilität.

## 2.4 Elektromobilität

Im Allgemeinen versteht man unter "Elektromobilität, die – Fortbewegung mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bzw. Verkehrsmitteln" (Konopka 2012). Sowohl Fahrzeuge als auch elektrische Antriebe gibt es in vielen Varianten. Daher benötigen sie eine differenzierte Definition. Der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung (NEE), durch welchen die übergeordnete Energiepolitik der BReg Anwendung im Verkehrssektor findet begrenzt den Begriff der Elektromobilität auf den Straßenverkehr und insbesondere auf Personenkraftwagen (PKW), leichte Nutzfahrzeuge, Zweiräder (Elekroroller, Elektrofahrräder) und Leichtfahrzeuge (vgl. BReg 2009a). In Bezug auf die Antriebstechnologien finden dort

- Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) und
- Plug-In-Hybridfahrzeuge (Plug-In-Hybrid-Electric Vehicle, PHEV)

Berücksichtigung. BEV werden mit einem Elektromotor betrieben, welcher aus einer Batterie gespeist wird. Die Reichweite des Fahrzeugs ist begrenzt durch die in der Batterie gespeicherte Energie. Ist die Energie der Batterie aufgebraucht, kann diese entweder am Stromnetz geladen oder ausgetauscht werden. Während das Laden eine Unterbrechung der Fahrt in Länge der benötigten Ladezeit bedeuten würde, führt der Austausch der Batterie nur zu einer kurzen Unterbrechung der Fahrt (vgl. Del Duce et al. 2013, S. 15).

PHEV verwenden eine Kombination aus einem batteriegespeisten Elektromotor und einem klassischen Verbrennungsmotor. Der Verbrennungsmotor wird nicht zum direkten Antrieb des Fahrzeugs genutzt, sondern dient dazu die Batterie im Falle eines geringen Ladestands aufzuladen, damit das Ziel der Fahrt erreicht werden kann (vgl. Abb. 2-1). Die Batterie wird wie bei BEV am Netz geladen. Zusätzlich fällt ein Bedarf an Treibstoff für den Verbrennungsmotor an (vgl. Del Duce et al. 2013, S. 15)

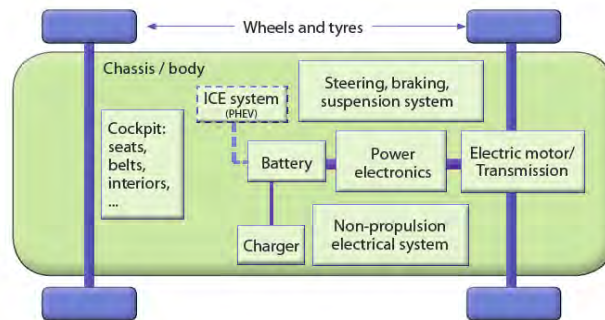


Abbildung 2-5: Schematischer Aufbau von BEV und PHEV aus (Del Duce et al. 2013)

Der eingangs erwähnte NEE der Bundesregierung sieht in der "[...] Elektrifizierung der Antriebe die wesentliche Stellschraube für einen zukunftsfähigen Verkehr [...]" (BReg 2009a, S. 2) und verfolgt mit diesem verstärkt die Weiterentwicklung von Batterietechnologien und Technologien für rein elektrische Antriebe. Wie bereits angeklungen, ist das mittelfristig anvisierte Ziel der Bundesregierung, dass bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren (vgl. 2.1). Erreicht werden soll dies vor allem durch die Förderung von Projekten zur Forschung und Entwicklung von Energiespeichern, Fahrzeugtechniken und der Netzintegration von Elektromobilen sowie durch Maßnahmen zur Marktvorbereitung und -einführung (BReg 2009a). Im Rahmen des NEE wird unter anderem auch das in Kapitel 2.2 erwähnte Projekt Fleets Go Green gefördert und soll daher im Folgenden kurz erläutert werden.

### 2.4.1 Fleets Go Green

Der Projektrahmen des Fleets Go Green Projektes zielt auf die "[...] ganzheitliche Analyse und Bewertung der Umwelteffizienz von BEV und PHEV in der Alltagsnutzung am Beispiel des Flottenbetriebes [...]" (FGG 2012, S. 2). Im Rahmen dieses Projektes werden BEV und PHEV beschafft, mit Messtechnik ausgerüstet und in der Alltagsnutzung in den Anwendungsszenarien Werksflotte und E-Car-Sharing-Flotte betrieben. Das Projekt ist aufgeteilt in fünf Module und verfolgt einen iterativen Ansatz zwischen den Phasen "Analyse und Bewertung" und "Anwendung" (vgl. Abb. 2-6). In der Analyse und Bewertung findet die Messung, Modellierung, Simulation und Bewertung der komponentenspezifischen Energieverbräuche der Fahrzeuge, die Untersuchung der Nutzerakzeptanz, die Betrachtung der Wechselwirkungen mit dem Stromnetz und die ökologische Bewertung statt. Die ökologische Bewertung erfolgt mit der Methode der Ökobilanz, findet Einfluss in alle Module und wird so dem Ziel einer Analyse der Umwelteffizienz gerecht. Der Teilbereich der Anwendung wird mit der Analyse und Bewertung verknüpft durch die "[...] Entwicklung einer

Entscheidungsunterstützung für das ökologisch orientierte Flottenmanagement [...] (FGG 2012, S. 3).

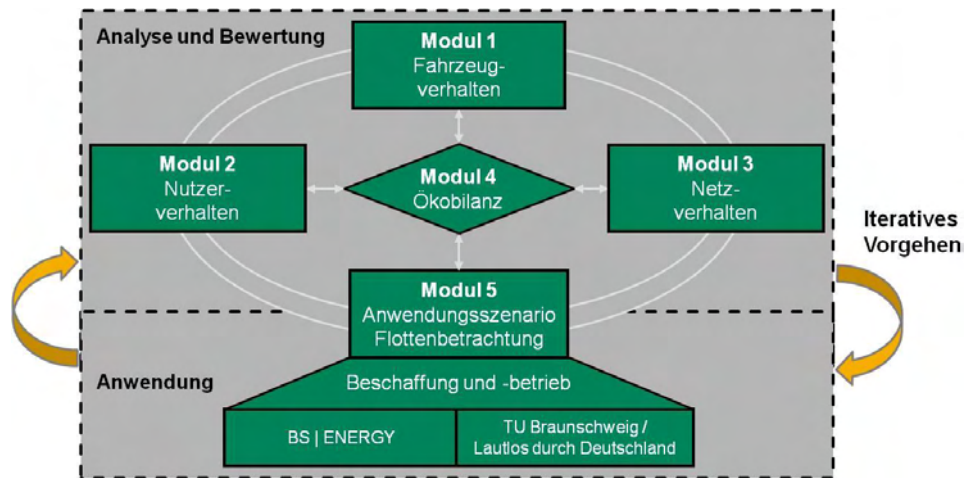


Abbildung 2-6: Projektinhalte Fleets Go Green, Quelle: [www.fleets-go-green.de](http://www.fleets-go-green.de)

Eine Betrachtung von PHEV innerhalb des FGG-Projektes findet nicht statt. Weiterhin wird das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (IWF) als Projektpartner innerhalb des FGG-Projektes ausschließlich BEV einsetzen und deren Einsatz als Werksflotte untersuchen. Damit beschränkt sich der Begriff der Elektromobilität in dieser Arbeit auf eine betriebliche Fahrzeugflotte batteriebetriebener PKW.

Es trägt als Forschungs- und Entwicklungsprojekt einen Teil zu einem Wandel hin zu einer Energieversorgung aus regenerativen Energien bei. Zum einen beinhaltet es die Entwicklung eines Konzepts zur aktiven Unterstützung des Stromnetzes durch die Einbindung von Elektrofahrzeugen, wodurch die Einbindung zusätzlicher erneuerbarer Energien gefördert wird. Zum anderen wird ein Konzept zur lokalen Versorgung von elektrisch betriebenen Fahrzeugflotten (siehe 2.4.2) entwickelt und erprobt. Dadurch können Netzverluste vermieden und der Ausbau erneuerbarer Energieträger gefördert werden (FGG 2012). Für ein solches Konzept zur lokalen Versorgung von Elektromobilen kommt dem Strom aus Photovoltaik eine besondere Rolle zu: Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit einem geeigneten Speichersystem stellen eine leicht zu realisierende Inselversorgung (vgl. 2.3) für Elektromobilflotten dar.

Werksflotten bzw. betriebliche Fahrzeugflotten wie sie im FGG-Projekt untersucht werden, spielen für den Wandel zu einem "elektromobilen" Verkehrssektor aufgrund ihres Potenzials zur Markteinführung von Elektromobilen eine übergeordnete Rolle, auf welche im Folgenden eingegangen werden soll.

### 2.4.2 Die Bedeutung betrieblicher Fahrzeugflotten für den Elektromobilitätsausbau

Nach dem Gabler Wirtschaftslexikon (Winter et al. 2009, S. 150) ist eine betriebliche Fahrzeugflotte die "[...] Gesamtheit aller Fahrzeuge einer organisatorischen Einheit und/oder bestimmter Bauart und/oder für eine bestimmte Einsatzart [...]". Eine betriebliche Fahrzeugflotte kann dementsprechend unterschiedlichen Einsatzzwecken dienen (Beförderung von Gütern und/oder Personen, Besorgungsfahrten, etc.) und aus unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Lastkraftwagen, Transporter, PKW, etc.) bestehen.

Die Bedeutung von betrieblichen Fahrzeugflotten im Kontext elektromotorisch betriebener PKW lässt sich am nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung und durch die Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes (KFA) zum Fahrzeugbestand und den jährlichen Neuzulassungen der Bundesrepublik Deutschland veranschaulichen:

Am 1. Januar 2013 waren 52,4 Millionen Kraftfahrzeuge (Kfz) mit amtlichen Kennzeichen zugelassen. 82,9% dieser Kfz sind PKW (Kraftfahrtbundesamt (KFA) 2013). Der Anteil von PKW mit alternativen Antrieben liegt hier bei 1,5% (Vorjahr: 0,8%), darin enthalten sind unter anderem 7114 Elektrofahrzeuge (+56,7% im Vergleich zum Vorjahr) und 64.995 Hybrid-Fahrzeugen (+ 36,4% im Vergleich zum Vorjahr) (KFA 2013). Auch wenn der Anteil an Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben seit 2009 mit der Einführung des NEE stetig steigt, ist das anvisierte Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 noch in weiter Ferne. Aus dem Fachartikel „Halter der Fahrzeuge“ des Kraftfahrt Bundesamtes geht hervor, dass etwa 57,4% aller Neuzulassungen betrieblichen Flotten im Gewerbe zuzuschreiben sind und dass diese PKW anschließend zu rund 95% als Gebrauchtwagen von Privatpersonen erworben werden (KFA 2011). Die Untersuchung betrieblicher Flotten ist damit essentiell zur Ermittlung von Verbesserungspotenzialen für den gesamten Fahrzeugbestand in Deutschland. Der NEE setzt hier in Form von Förderungen zu Projekten an, welche die Entwicklung der Elektromobilität im Kontext von betrieblichen Fahrzeugflotten unterstützen (BReg 2009a) – beispielsweise FGG (vgl. 2.2.1).

Nachdem nun die Grundlagen für die Themenfelder regenerative Energien, Photovoltaik und Elektromobilität eingeführt wurden, soll im Folgenden deren Interaktion und die daraus entstehenden Chancen und Risiken erläutert werden.

## 2.5 Das Zusammenwirken von Elektromobilität und Photovoltaik

Wie in Kapitel 2.1 geschildert, ist die Reduktion der THG ein primäres Ziel deutscher Energiepolitik. Während die Sektoren Energiewirtschaft und Industrie hier bereits große Erfolge vorzuweisen haben, ist die Situation im Verkehrssektor eine andere: Gemessen an den THG hat sich die Umweltbelastung des Verkehrssektors zwischen 1960 und heute mehr als verdoppelt (BMW 2013). Im Wesentlichen ist der Straßenverkehr mit rund 178 Millionen

Tonnen CO<sub>2</sub> und damit für 83 Prozent der Emissionen im Verkehrssektor im Jahre 2009 verantwortlich (Zimmer et al. 2011)– der PKW-Verkehr verursacht damit insgesamt etwa 14% der gesamten THG (BReg 2009a). Der ungebrochene Trend bei Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (ICE) zu leistungs- und verbrauchsstärkeren Modellen, sowie die steigende Verkehrsleistung laufen den Einsparungen durch die Entwicklung effizienterer Verbrennungsmotoren entgegen (Zimmer et al. 2011). Hinzu kommt der mit maximal 40% vergleichsweise geringe Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren in PKW. Die im Treibstoff enthaltene Energie geht zum größten Teil als Wärme verloren. Elektrische Fahrzeugmotoren hingegen erreichen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren Wirkungsgrade von etwa 90% und setzen den eingesetzten Strom im Verkehr emissionsarm (PHEV) bis emissionsfrei (BEV) um (Kasten und Zimmer 2011). Jedoch ist zu berücksichtigen, dass es sich bei Strom, im Gegensatz zu Treibstoff, um Nutzenergie handelt. Die Bereitstellung der Nutzenergie ist ausgehend von der eingesetzten Primärenergie mit Verlusten behaftet. Für die Bereitstellung von Strom aus dem deutschen Stromgestehungsmix sieht die Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2009 einen Primärenergiefaktor<sup>3</sup> von 2,6 vor (BReg 2009b). Treibstoffe auf fossiler Basis für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren haben einen Primärenergiefaktor von etwa 1,2 (vgl. Frischknecht et. al 2012, S. 3). Berücksichtigt man die gesamten Umwandlungsverluste bis zur Bereitstellung der Fahrleistung, ergibt sich für das Elektrofahrzeug nur ein minimal besserer Primärenergieeinsatz. Die Effizienz von Elektrofahrzeugen hängt also maßgeblich von der Art der Bereitstellung des eingesetzten Stroms ab. Und ebenso die Umweltwirkungen. Hier birgt der Einsatz von regenerativem Strom, welcher einen wesentlich geringeren Primärenergiefaktor hat, enorme Potenziale für die Effizienz und Umweltwirkungen von Elektromobilen.

Dieses Potenzial kann nur bei Beladung der Batterie mit Strom aus regenerativen Quellen voll ausgeschöpft werden. Momentan erfolgt das Betanken elektrisch angetriebener Fahrzeuge, also das Beladen der Batterie, in den meisten Fällen mit Energie aus dem Stromnetz. Hierbei fallen Emissionen an; im Vergleich zu der direkten Nutzung des Treibstoffs in Verbrennungsmotoren aber zeit- und ortsversetzt (Helms et al. 2011). Die Höhe der Emissionen hängt dabei wesentlich von der Zusammensetzung des verwendeten Stromgestehungsmix ab. Je höher hier der Anteil an regenerativer Energie ist, desto höher das ausgeschöpfte THG-Einsparpotenzial.

Durch ein Screening aktueller Studien<sup>4</sup>, die eine vergleichende Aussage über die Umweltwirkungen von konventionell mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen treffen wollen,

---

<sup>3</sup> Der Primärenergiefaktor berücksichtigt den Energieverlust bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung eines Energieträgers. Daraus lassen sich Energieeffizienz und der schonende Umgang mit Ressourcen ablesen (Frischknecht et. al 2012).

<sup>4</sup> Die entsprechende Literatur ist Tabelle 0-1 in Anhang 1 zu entnehmen.

konnte ebendiese Aussage extrahiert werden: Nur durch den zusätzlichen, an den Mehrbedarf durch Elektrofahrzeuge gekoppelten Ausbau von erneuerbaren Energien kann eine Verminderung des Emissionsniveaus unter das Niveau von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren geschaffen werden. Hier ist anzumerken, dass bei einer Betrachtung der Umweltauswirkungen, die über die klimawirksamen Emissionen hinausgeht, Elektrofahrzeuge bei einer ganzheitlichen Betrachtung teilweise schlechter abschneiden als ICE. Als maßgebliche Gründe werden durchweg die Produktion und das Recycling bzw. die Entsorgung der benötigten Batterien angeführt, vgl. z.B. Frischknecht und Flury (2011). Die Nutzungsphase von Elektromobilen hat jedoch den größten Anteil der Umwelteinflüsse im Lebensweg von Elektromobilen (Helms et al. 2011). Damit ist der in der Nutzungsphase von Elektromobilen eingesetzte Strom die entscheidende Stellschraube für eine bessere Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen.

Unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energieträgern (Helms et al. 2011) bestehen demnach enorme Potenziale einer klimaverträglicheren Struktur des Verkehrssektors. Der Photovoltaik kann dabei eine besondere Rolle zugeschrieben werden, da sie fast überall einsetzbar und erschwinglich ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Sonneneinstrahlung im Tages- und Jahresverlauf schwankt und daher nicht zu jedem Zeitpunkt Sonnenstrom zur Verfügung steht. Eine Beladung des Fahrzeugs zu Zeiten, an denen Solarstrom zur Verfügung steht, wäre daher wünschenswert und kann in Einzelfällen über intelligente Lademanagementsysteme bereits realisiert werden. Die Installation einer PVA mit einem zusätzlichen Speicher und vorrangigem Eigenverbrauch ist eine sinnvolle Alternative. Jedoch stellt sich die Frage nach dem ökologischen Einfluss einer massenhaften Einführung von PVA und Speichersystemen. Bei der Herstellung von PVA fallen zwar verhältnismäßig wenig THG an, dafür aber eine Reihe von umwelt- und gesundheitsbelastenden Stoffen. So werden bei der Produktion ätzende Chemikalien verwendet und das Silizium wird mit Phosphor- und Borsäure angereichert (Watter 2009). Das Fraunhofer Institut (IBP) hat eine Reihe von Ökobilanzen zur Bewertung des Treibhauspotenzials verschiedener Solarmodule durchgeführt und konnte für PV-Strom aus mono-/multi-kristallinem Silizium einen Einfluss von 26/25 g CO<sub>2</sub> Äquivalenten pro kWh ermitteln<sup>5</sup> (Held 2010). Solarzellen aus Cadmium-Tellurid (CdTe) weisen nach der Studie des Fraunhofer-Institutes zwar ein geringeres Treibhausgaspotenzial auf, jedoch ist Cadmium ein giftiges, als krebserregend eingestuftes Schwermetall (Mertens 2013). Die größten Umweltbelastungen entstehen also material- und prozessbedingt im Herstellungsprozess der PV-Module (Jungbluth 2007). Durch Recycling können heute schon Umweltbelastungen vermieden werden (Junghans 2005). Nach Nill (2004) werden die Umweltbelastungen bis

---

<sup>5</sup> Annahmen der Ökobilanzen: Modullebensdauer 30 Jahre, Sonneneinstrahlung 1700 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), 75% Systemwirkungsgrad, optimale Ausrichtung zur Sonne.

2020 um bis zu 70% abnehmen. Vor allem bei der Herstellung können durch verbesserte Fertigungstechniken, Verringerungen im Material- und Energieverbrauch und erhöhte Wirkungsgrade Reduktionen der Belastungen erreicht werden (Junghans 2005). Jedoch bleibt festzuhalten, dass bei einer alleinigen Betrachtung der THG evtl. andere Umweltbelastungen, welche mit der Bereitstellung von Solarstrom verknüpft sind, nicht berücksichtigt würden. Gleiches gilt für die Bereitstellung von Speichersystemen.

Somit gilt es zu klären ob die Versorgung von Elektromobilen mit Strom aus PVA bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Umweltwirkungen, unter Einbeziehung der Herstellung der benötigten Systeme ökologisch sinnvoller ist. Um diese Frage zu klären werden in Kapitel 4 zwei Szenarien zur Solarstrombereitstellung unter ökologischen Aspekten miteinander verglichen und deren Umweltpotenzial einer Versorgung des Fahrzeuges mit Strom aus dem deutschen Strom-Mix gegenübergestellt. Die ökologische Bewertung der System-Varianten erfolgt mit der Methode Ökobilanz, welche im Folgenden eingeführt wird.



## 2.6 Ökobilanzierung

Die Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen ist immer mit unerwünschten Nebeneffekten verbunden, indem die natürliche Umwelt durch Emissionen und Entnahmen (Ressourcenverbrauch) beeinträchtigt und geschädigt wird. Der Preis der hergestellten Güter spiegelt sich in den Beeinträchtigungen von Umweltleistungen – wie das Bereitstellen von Ressourcen oder das Reinigen anthropogener Abfälle – jedoch kaum wieder. Daher wurden Methoden wie die Ökobilanzierung entwickelt, um das bestehende Preissystem, welches für Umweltschäden fast blind ist, zu ergänzen (Klöpffer und Grahl 2009). Diese Methoden sollen Informationen bezüglich der Schädigung der Umwelt durch Schadstoffemissionen und Ressourcennutzung bereitstellen. Eine Ökobilanz liefert damit Informationen über Umweltaspekte eines Produktes, einer Dienstleistung oder eines Prozesses. In der Entscheidungsfindung über dieses Produkt oder diesen Prozess werden aber neben umweltrelevanten vor allem wirtschaftliche und technische aber auch soziale Aspekte mit einbezogen. Entsprechend können Ökobilanz-Ergebnisse die Entscheidungsfindung nicht ersetzen, können aber entscheidungsunterstützend wirken (Frischknecht 2009).

### 2.6.1 Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044

Der Begriff der Ökobilanzierung, im englischen Sprachgebrauch Life Cycle Assessment (LCA), hat sich nach langen Jahren der Begriffsfindung als Definition für eine Methodik etabliert, die alle relevanten Umweltauswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über alle Lebenswegabschnitte zu erfassen, zu aggregieren und zu bewerten versucht (Klöpffer und Grahl 2009). Zielsetzung nach (Schmidt und Schorb op. 1995) dabei ist im Allgemeinen:

- Eine Schonung bzw. effizientere Nutzung materieller Ressourcen und
- eine Verringerung der Belastung der Umwelt durch Emissionen und Abfälle.

Um diese Ziele zu erreichen, kombiniert das Life Cycle Assessment zwei Modellierungsphasen miteinander. In der ersten Phase werden anthropogene Stoff- und Energieströme (Sachbilanz bzw. Life Cycle Inventory, LCI) erfasst und analysiert, welche mit der Bereitstellung des Produktes/ der Dienstleistung verbunden sind. In der zweiten Phase werden die Ergebnisse dieser Sachbilanz in Bezug auf ihre Wirkungen für die natürliche Umwelt analysiert (Wirkungsabschätzung bzw. Life Cycle Impact Assessment, LCIA; Schmidt et al. 2009).

Die Ergebnisse von Ökobilanzen werden als Unterstützung für betriebswirtschaftliche und vermehrt für politische Entscheidungsfindungen verwendet. Um ein gewisses Maß an Vergleichbarkeit und konsistenten Ergebnissen zu gewährleisten, ist die Ökobilanzierung und der Aufbau einer Ökobilanz-Studie nach den ISO Normen 14040 bis 14043 standardisiert. Mittlerweile werden diese Normen zusammengefasst in der ISO Norm 14044 (DIN EN ISO



14044:2006-10). Nach dieser Norm werden vier grundlegende und in der Durchführung aufeinander folgende Elemente einer produktbezogenen Ökobilanz festgelegt:

- Zieldefinition und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

In Abbildung 2-7 lässt sich erkennen, dass sich die unterschiedlichen Elemente gegenseitig beeinflussen. Diese Darstellung wird dem iterativen Charakter von Ökobilanzen gerecht. Dieser erlaubt es beispielsweise die Ziele einer Ökobilanz während der Anfertigung zu erweitern oder einzuschränken und dient dazu konsistente Ergebnisse zu erzielen.

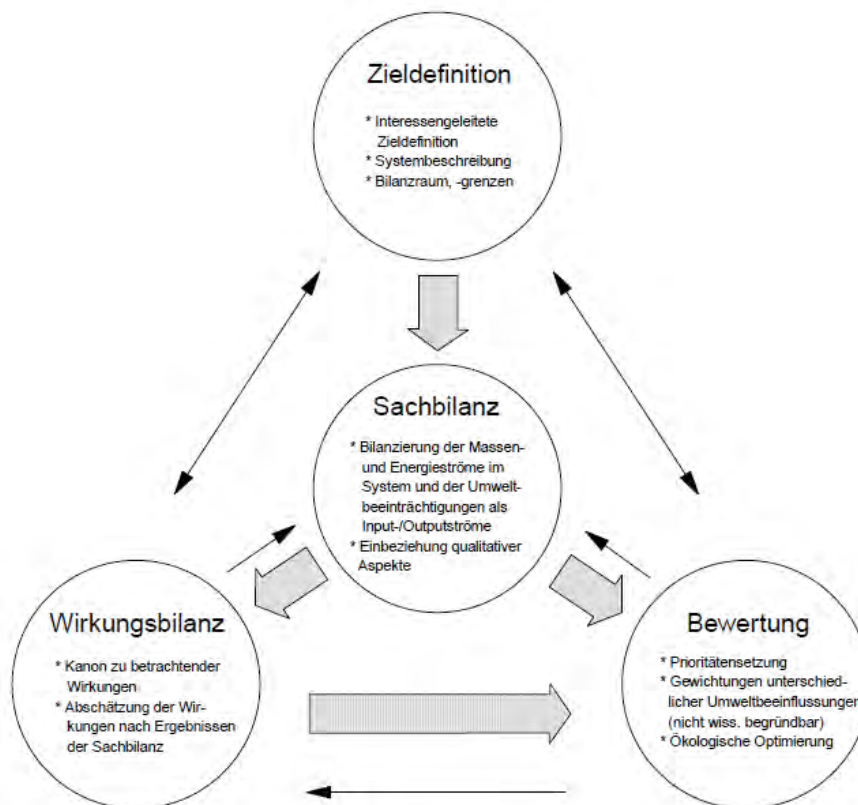


Abbildung 2-7: Prozessschema einer Ökobilanz (Schmidt und Schorb op. 1995)

Die erste Stufe einer Ökobilanz, die **Zieldefinition und Untersuchungsrahmen** (Goal & Scope), enthält alle Entscheide, welche für die nachfolgenden Phasen und für das Ergebnis der Ökobilanz von zentraler Bedeutung sind. Unter anderem werden Fragen nach dem Gebrauch der Ergebnisse (firmenintern oder öffentlich?), dem Zweck der Studie (Dokumentation oder entscheidungsunterstützende Information?), dem geographischen, zeitlichen und technischen Geltungsbereich, den Anforderungen an die Datenqualität, der Finanzierung und dem Untersuchungsgegenstand gestellt (Baumann und Tillman 2004). Die

Beschreibung des zu untersuchenden Gegenstandes, der sogenannten funktionellen Einheit, ist ein Kernstück jeder Ökobilanz. Die funktionelle Einheit ist Bezugs- und - je nach Zielsetzung - auch Vergleichsgröße. Auf sie werden alle Umweltbelastungen umgelegt. Die funktionelle Einheit kann auf der Ebene des Produktes oder der damit erbrachten Dienstleistung definiert werden. Jeder Verbrauch von Ressourcen und jede Emission von Stoffen in die Umwelt wird im Verlauf der Ökobilanz in Bezug auf diese funktionelle Einheit berechnet. Die ISO 14044 definiert die funktionelle Einheit als „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN ISO 14044:2006-10).

Desweiteren werden diejenigen Umweltaspekte definiert, die bei der Interpretation berücksichtigt werden sollen. Der Untersuchungsrahmen der Studie wird abgesteckt, indem die für ein Produkt maßgeblichen Prozesse und damit die Systemgrenzen bestimmt und beschrieben werden. Die Systemgrenze beschreibt vor allem die Berücksichtigung von Vorketten, welche in den Prozess einfließen. Wird beispielsweise das zu analysierende Produkt während seines Lebensweges transportiert, sollten die damit verbundenen Emissionen erfasst werden. Ob nun lediglich der Verbrauch des Kraftstoffes oder auch die Bereitstellung des Kraftstoffes (Vorkette) und/oder die Bereitstellung des Transportmittels (Vorkette) Berücksichtigung finden, hängt ab von den Systemgrenzen, welche in der Zieldefinition festgelegt werden (Schmidt et al. 2009).

Stufe 2, die **Sachbilanz** (Life Cycle Inventory, LCI), ist die Zusammenstellung der durch das betrachtete Produkt oder Produktsystem verbrauchten Ressourcen und der in die Umwelt abgegebenen Emissionen. In der ISO 14044 wird die Sachbilanz als „die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines Produktes im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN EN ISO 14044:2006-10) definiert. Dazu wird – meist softwaregestützt – ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und möglichst mit Primärdaten gefüllt. Primärdaten sind im spezifischen Prozesssystem erhobene/gemessene Daten und bilden das Vordergrund-System (Foreground). Sekundärdaten sind Literaturwerte und generische Datensätze aus Datenbanken zur Modellierung unbekannter oder sich wiederholender Prozesse. Sie bilden das Hintergrund-System (Background). In der Praxis hilft es das zu betrachtende Produktsystem in Vorder- und Hintergrundsystem zu teilen. Das Vordergrund System beinhaltet die bekannten Prozesse. Für diese können reale spezifische Prozessdaten erhoben werden. Das Hintergrund-System betrachtet die unbekannteren vorgelagerten Prozesse wie die eingesetzten Materialien, Energien und Transportservices. Da für diese Prozesse meistens keine realen und spezifischen Daten vorliegen, wird hier auf generische Sachbilanzdaten aus entsprechenden Datenbanken zurückgegriffen (ILCD 2010). In der Modellierung werden Vorder- und Hintergrundsystem verknüpft. Das gesamte Produktsystem besteht aus einer Vielzahl von Prozessen, die es zur Herstellung des Produktes

braucht und die miteinander in Beziehung stehen. Für jeden dieser Prozesse werden die Energie- und Stoffflüsse erfasst. Die Bilanzierung aller Energie- und Stoffflüsse oder Stoffströme, bezogen auf die funktionelle Einheit wird auch als Stoffstromanalyse bezeichnet. Sie bildet die Grundlage für Stufe 3 der Ökobilanz, die Wirkungsabschätzung (Schmidt und Schorb op. 1995).

In der **Wirkungsabschätzung** (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) wird aus den Elementarflüssen der Sachbilanz eine Wirkung auf die Umwelt abgeschätzt. Die ISO 14044 definiert die Wirkungsabschätzung als „Bestandteil einer Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“ (DIN EN ISO 14044:2006-10). Die Wirkungsabschätzung dient der Kommunikation und Entscheidungsunterstützung. Damit die Ergebnisse der Sachbilanz diesem Anspruch gerecht werden können, müssen sie verdichtet und damit gewichtet oder priorisiert werden (Frischknecht 2009). Die Art der Gewichtung wird bereits in Phase 1 festgelegt und bedient sich etablierter Bewertungsmodelle, welche sich verschiedener Indikatoren bedienen.

Die in dieser Arbeit verwendete Bewertungsmethode CML 2001 nimmt "eine auswirkungsorientierte Klassifizierung von Stoff- und Energieströmen zur Wirkungsabschätzung vor (Adensam et al. 2000). Dabei werden alle In- und Output-Ströme der Sachbilanz mit gleichen Wirkungen zu Wirkungspotenzialen (auch: Midpoint-Indikatoren) aggregiert (Klassifizierung). Beispielsweise werden alle Emissionen, die den Klimawandel vorantreiben, in der Kategorie Treibhauspotenzial zusammengefasst und in kg CO<sub>2</sub> Äquivalenten gemessen – Methan hat z.B. einen 25-mal stärkeren Einfluss als CO<sub>2</sub>. Die Äquivalenzfaktoren beruhen in der Regel auf Erkenntnissen internationaler Expertengremien, z.B. IPCC (Klopffer und Grahl 2009). In Tabelle 2-2 finden sich alle durch die CML-Methode abgedeckten Wirkungspotenziale und die dazugehörigen Äquivalenz-Einheiten nach (Adensam et al. 2000).

*Tabelle 2-2: Wirkungskategorien der CML-Methode nach Adensam (2000)*

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Einheit</b>
Erschöpfung abiotischer Ressourcen	Kg Antimon Äquivalente
Terrestrische Ökotoxizität	Kg 1,4-DCB Äquivalente
Aquatische Ökotoxizität	Kg 1,4-DCB Äquivalente
Humantoxizität	Kg 1,4-DCB Äquivalente
Photochemische Oxidation (Sommersmog)	Kg Ethylen Äquivalente
Stratosphärischer Ozonabbau	Kg CFC-11 Äquivalente
Treibhauspotenzial	Kg CO <sub>2</sub> Äquivalente
Überdüngungspotenzial	Kg PO <sub>4</sub> / Kg NO <sub>x</sub> Äquivalente
Versauerungspotenzial	kg SO <sub>2</sub> Äquivalente

Die CML-Methode liefert quantifizierte Daten zum Umwelteinfluss des analysierten Systems und erlaubt damit eine differenzierte Betrachtung der Umweltwirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die Methode ist damit zwar transparenter aber für Laien ist eine Gesamtbeurteilung mit diesen Ergebnissen schwer möglich. Im Anschluss erfolgt daher häufig eine Normalisierung der Ergebnisse zu dimensionslosen Kenngrößen, den Endpoint-Indikatoren (vgl. Abbildung 2-8).

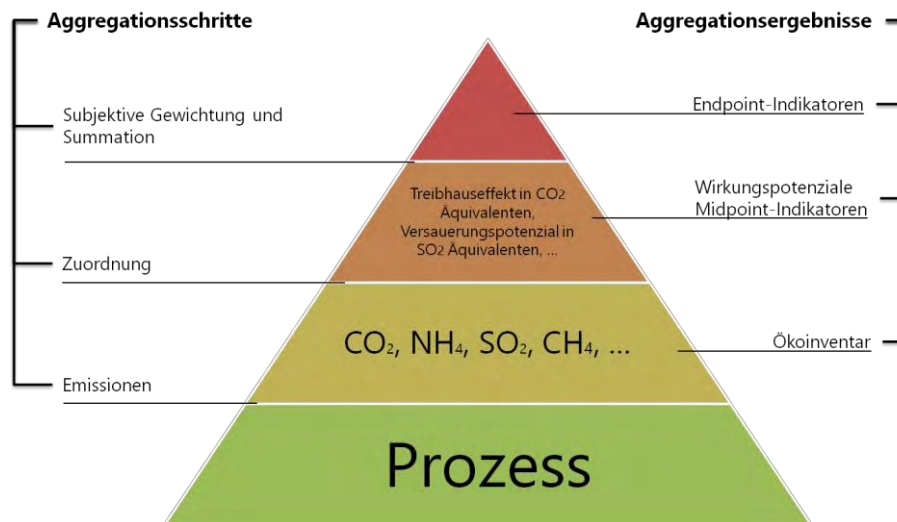


Abbildung 2-8: Aggregationsschritte und -Ergebnisse in der Wirkbilanz

Für die Normalisierung der Midpoint-Indikatoren werden Faktoren gewonnen, indem Expertenbefragungen, politische Ziele oder Ziele des Auftraggebers der Ökobilanz-Studie herangezogen werden. Die Aussage von Endpoint-Indikatoren ist damit immer subjektiv und kritisch zu hinterfragen (Adensam et al. 2000).

In der vierten und letzten Stufe der Ökobilanz nach ISO 14044, der **Auswertung** (Interpretation), werden Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen durchgeführt und Aussagen zur Datenqualität gemacht. Außerdem werden die wichtigsten Parameter (Prozesse, Wirkungskategorien, etc.) identifiziert, Schlussfolgerungen und Empfehlungen entwickelt und ein Bericht verfasst. Falls die Ökobilanz veröffentlicht wird, ist gemäß ISO 14044 eine kritische Nachprüfung durch einen unabhängigen Gutachter durchzuführen.

### 2.6.2 Softwaregestützte Ökobilanzierung auf Basis von Stoffstromnetzen

Den Kern einer jeden Ökobilanz bildet die Sachbilanz. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um produktbezogene Stoff- und Energiebilanzen, in der alle In- und Outputs einem Produkt in Stück oder Kilogramm zugerechnet werden können. Die Abbildung und Modellierung eines solchen Systems basiert auf dem Ansatz der Stoffstromnetze. Stoffstromnetze weisen die Summe aller in ein System einfließenden und ausfließenden sowie

die Stoffströme im System innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Periode) aus (Wohlgemuth 2012). Die systematische Beschreibung von Stoffstromnetzen erfolgt über das formale Modell der Petri-Netze. Diese wurden in den 1960er Jahren von dem Informatiker Carl Adam Petri zur Beschreibung nebenläufiger Schaltvorgänge in Automaten entwickelt und werden heute vor allem zur formalen Beschreibung von Modellen in der Informatik verwendet (Grude 1988). In der einfachsten Darstellung stellt sich ein Petri-Netz als ein Graph dar, welcher aus zwei Arten von Knoten aufgebaut ist, die Stellen bzw. Transitionen genannt werden (vgl. Abb. 2-9). Diese Knoten sind durch Kanten (Verbindungen) verbunden, und zwar jeweils von einer Stelle zu einer Transition oder umgekehrt.

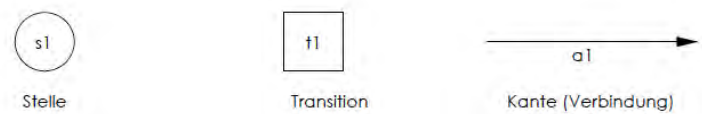


Abbildung 2-9: Elemente von Petri-Netzen, Quelle: (Schmidt und Schorb op. 1995)

Transitionen sind Knoten im Stoffstromnetz, in denen Materialien umgewandelt werden. Diese definieren, wie Eingangsstoffe und Energien in Ausgangsstoffe (Produkte oder Abfälle) umgewandelt werden. Sie werden zur Abbildung jeder Art von betrieblichen Prozessen genutzt. Transitionen sind einerseits immer über Verbindungen mit einer oder mehreren Stellen verbunden aus welchen sie Eingangsströme bezieht und andererseits mit Stellen, an welche Sie Ausgangsströme abgeben. Eine Transition kann mit einer weiteren Transition nur über eine Stelle (Transition, Verbindung, Stelle, Verbindung Transition) verbunden werden (Wohlgemuth 2012). Analog zu Flussdiagrammen können auch Transitionen linear oder relativ spezifiziert werden.

Nach (Wohlgemuth 2012) sind Stellen Knoten im Stoffstromnetz, an denen keine Umwandlung von Stoffen stattfindet. Es gibt vier verschiedene Arten von Stellen:

- Input-Stellen bilden die Energie- und Stoffstrom-Quellen für Transitionen.
- Output-Stellen bilden die Energie- und Stoffstrom-Senken für Transitionen.
- Connection-Stellen verbinden Transitionen miteinander.
- Lager-Stellen in denen einfließende Ströme zu Beständen aufaddiert und abfließende Ströme von den Beständen subtrahiert werden.

In der Logik von Stoffstromanalysen stellen In- und Output-Stellen immer die Systemgrenzen dar. Verbindungen, Lager und Transitionen liegen immer innerhalb der System-Grenzen.

Verbindungen verknüpfen Transitionen und Stellen miteinander, so dass sich eine Netzstruktur ergibt. Verbindungen zwischen zwei gleichartigen Elementen sind nicht

gestattet (vgl. Abb. 2-10). Sie können von Transitionen zu Stellen oder von Stellen zu Transitionen führen und geben damit die Richtung der Stoffströme an (Wohlgemuth 2012).

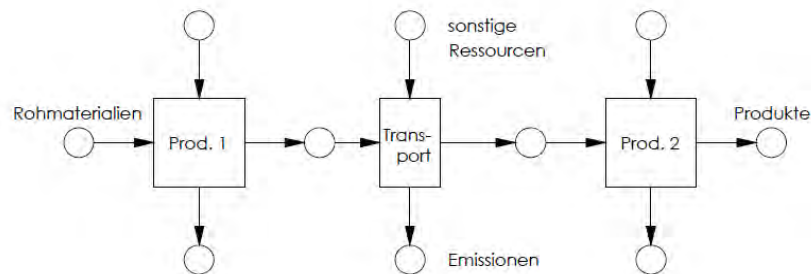


Abbildung 2-10: Stoffstromnetz mit Elementen der Petri-Netz-Theorie, Quelle: (Schmidt und Schorb op. 1995)

Mit diesem methodischen Gerüst kann aus einer Vielzahl von Stellen, Transitionen und Verbindungen die Bereitstellung eines Produktes / einer Dienstleistung als Stoffstromnetz beliebig detailliert beschrieben, berechnet und ausgewertet werden.

### 2.6.3 Stoffstromanalysen mit Umberto NXT LCA

Kernfunktionalität der Software *Umberto NXT LCA* (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH) ist das Modellieren, Abbilden, Berechnen und Auswerten von Stoffstromnetzen auf der theoretischen Basis von Petri-Netzen mit dem Ziel einer ISO-konformen Ökobilanzierung. Die Modellierung eines Stoffstromnetzes erfolgt in *Umberto NXT LCA* in einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI), welche es erlaubt, alle Elemente eines Stoffstromnetzes (Stellen als Kreise, Transitionen als Rechtecke, Verbindungen als Pfeile) zu zeichnen und anschließend zu spezifizieren. Die Transitionen, als Knoten zur Umwandlung von Stoffen, werden über das GUI mit In- und Output-Strömen versehen und deren Verhältnis zueinander wird festgelegt. Dies kann linear oder funktional erfolgen. Materialien können erstellt und Input-, Output- und Lagerstellen zugewiesen werden. In Kombination mit Materialien und Prozessen aus gängigen Ökobilanzdatenbanken (Sachbilanzdaten u.a. zur Energiebereitstellung, zur Materialherstellung und -verarbeitung, zu Transport- und Entsorgungsdienstleistungen) und einer Vielzahl von Bewertungssystemen lässt sich in *Umberto NXT LCA* ein modelliertes Stoffstromnetz schnell einer fundierten ökologischen Bewertung nach ausgewählten Kriterien unterziehen. Die anschließende Stoffstromanalyse erfolgt unter Verwendung von Bilanztabellen bzw. direkt im, mit Sankey-Diagrammen<sup>6</sup> kombinierten, Stoffstromnetz. Datenexport- und Dokumentationsfunktionen unterstützen die Aufbereitung der Ergebnisse.

<sup>6</sup> Grafische Darstellung der Verbindungen (Mengenflüsse) im Stoffstromnetz mit mengenproportionalen Pfeilen zur Veranschaulichung der qualitativen und quantitativen Flüsse von Stoffströmen (Huber 05.07.2012).

### 3 Datenerhebung

In diesem Teil der Arbeit soll die Datengrundlage geschaffen werden, auf welcher die Ökobilanz-Studie in Kapitel 4 durchgeführt werden soll. Im Rahmen des FGG-Projektes wird die konventionell betriebene Fahrzeugflotte des IWF durch elektrisch angetriebene Fahrzeuge ausgetauscht werden. Die grundlegenden Daten dieser Elektromobile sollen im Folgenden zunächst eingeführt werden. Darauf folgt im Hinblick auf die einzuführenden Elektromobile eine Auswertung der Nutzungsdaten der auszutauschenden konventionellen Fahrzeuge. Im Anschluss werden diese Daten miteinander kombiniert um ein Elektromobil mit den Nutzungsdaten des IWF als Untersuchungsgegenstand für die in Kapitel 4 folgende Ökobilanz zu schaffen. Es erfolgt außerdem eine Einführung in die Sachbilanzdatenbank *ecoinvent 2.2*, welche in der Ökobilanz als Datenbasis für das Hintergrund-System (vgl. 2.6.1) dient.

#### 3.1 Datengrundlage der einzuführenden Elektromobilflotte

Im Rahmen des FGG-Projektes werden am IWF insgesamt vier BEV zu verschiedenen Untersuchungszwecken angeschafft: zwei Mia MiAmore (Mia), sowie zwei Citroen C-Zero. Mangels vorliegender Messdaten zu Reichweite, Verbrauch und Ladezeiten, müssen diese Daten auf Grundlage der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Fahrzeugdaten und sinnvoller Annahmen abgeschätzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die einzuführende BEV Flotte nur eines der beiden Fahrzeugmodelle als Untersuchungsgegenstand gewählt. Die Wahl fiel aus verschiedenen Gründen auf den Mia: Zum einen sind in 96% der dokumentierten Fahrten der konventionellen Flotte drei oder weniger Personen an Bord des Fahrzeugs dokumentiert (Kurmann 2013). Zum anderen wird am IWF voraussichtlich keine Ladeinfrastruktur für eine Beladung bei 400 V bereitgestellt, wodurch die geringere Ladezeit des Mia gegenüber dem Citroen C-Zero bei 230 V unter Umständen zu einer intensiveren Nutzung dessen führen könnte. Für den Mia als technologisch effektiveres Fahrzeug sprechen weiterhin die doppelte Lebensdauer der Batterie und der geringere Verbrauch (vgl. Tab 3-1).

*Tabelle 3-1: Technische Daten der im FGG-Projekt eingesetzten Elektromobile Mia MiAmore nach (mia electric 2012) und Citroen C-Zero nach (Kurmann 2013)*

	Mia MiAmore	Citroen C-Zero
<b>Reichweite [km]</b>	130	150
<b>Höchstgeschwindigkeit [km/h]</b>	100	130
<b>Stromverbrauch lt. Hersteller [kWh/100 km]</b>	12,5	13,5
<b>Kapazität der Batterie [kWh]</b>	12	16
<b>Ladedauer [h]</b>		
<b>bei 230 V</b>	5	9
<b>bei 400 V</b>	-	0,5 (auf 80%)
<b>Lebensdauer der Batterie</b>	2000 Ladezyklen	1000 Ladezyklen
<b>Anzahl der Sitzplätze</b>	3	4



Da es sich bei den technischen Daten in Tabelle 3-1 um Herstellerangaben handelt, soll im Folgenden auf die Problematik des Stromverbrauches und der Reichweite des Mia genauer eingegangen werden. Der limitierende Faktor für die Reichweite von Elektrofahrzeugen ist die Kapazität der eingesetzten Batterien. Je höher die Kapazität, desto höher die Reichweite eines BEV. Die Kapazität der eingesetzten Li-Ion-Batterien ist jedoch stark temperaturabhängig. Dies liegt an dem dickflüssigeren Elektrolyten der Batterie bei geringen Temperaturen, wodurch der Innenwiderstand der Batterie steigt und somit weniger Strom abgegeben werden kann (Retzbach 2008). Bei geringen Temperaturen sinkt also die Reichweite. Hinzu kommt bei geringen Temperaturen ein größerer Fahrwiderstand aufgrund von Winterbereifung und ggf. schneebedeckter Fahrbahn. Außerdem wird bei niedrigen Temperaturen die Beheizung des Innenraums nötig. Diese kann Elektromobilen nicht durch die Abwärme des Motors geschehen, sondern erfolgt durch eine Elektroheizung bzw. in neueren Modellen in Kombination mit einer Wärmepumpe. Diese Faktoren erhöhen zusätzlich den Stromverbrauch im Winter (Del Duce et al. 2013). Für BEV wie den Mia ergibt sich bei Temperaturen um 0 °C also eine signifikante Steigerung des Verbrauchs und damit eine Verringerung der Reichweite (DEKRA 2012). In der Zeitschrift Auto Motor Sport (Bloch 2011 zitiert in: Kurmann 2013) wurde unter anderem die temperaturabhängige Reichweite des Mia Electric (baugleich zum Mia MiAmore) unter Verwendung von zwei Fahrzyklen, dem EU-Zyklus und dem TÜV Süd-E-Car-Cycle (TSECC), ein speziell für Elektromobile entwickelter Fahrzyklus, untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 3-2 dargestellt:

*Tabelle 3-2: Reichweite des Mia in unterschiedlichen Fahrzyklen nach Bloch (2011) zitiert in Kurmann (2013)*

	<b>Mia Electric</b>
<b>Heizungssystem</b>	Elektrisch
<b>Energiegehalt Akku [kWh]</b>	12
<b>Nutzbarer Energiegehalt Akku [kWh]</b>	11,7
<b>Reichweite [km]</b>	
<b>Werksangabe</b>	120
<b>EU-Zyklus bei 23 °Celsius</b>	120
<b>TSECC bei 23 °Celsius</b>	100
<b>TSECC bei -7 °Celsius</b>	93

Zum Testzeitpunkt befand sich der Mia Electric noch im Prototypenstadium und der Winterbetrieb erfolgte ohne Heizung. Der Einsatz einer Heizung würde die Reichweite bei -7 °C ca. um zusätzliche 20% verringern (Schuster und Leitinger 2011); innerhalb des TSECC verliert der Mia Electric damit insgesamt 27% seiner Reichweite. Unter Berücksichtigung der Werksangaben des Mia MiAmore und gleicher Verluste im EU-Zyklus und TSECC wie für den Mia Electric, kann für Temperaturen bis 23 °C ("sommerliche Temperaturen") von einer maximalen Reichweite von maximal 120 km ausgegangen werden; für Temperaturen um -7 °C ("winterliche Temperaturen") maximal 80 km.



Unter Vernachlässigung weiterer Verluste kann aus diesen Angaben der durchschnittliche Verbrauch für „winterliche“ und „sommerliche“ Temperaturen abgeleitet werden. Dazu wird die maximale Reichweite in jedem Fall durch den nutzbaren Energiegehalt der Batterie dividiert und damit ein lineares Verhalten bei der Entladung des Akkumulators angenommen. Bei Temperaturen um die 20 °C errechnet sich so ein Verbrauch von 9,75 kWh/100 km, während es bei Temperaturen um 0 °C 14,6 kWh/100 km sind.

$$\text{Verbrauch} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right] = \frac{\text{nutzbarer Energiegehalt} [\text{kWh}]}{\text{maximale Reichweite} [\text{km}]}$$

Für die Beladung der Batterie wird entgegen der physikalischen Realität ebenfalls ein lineares Verhalten<sup>7</sup> auf Basis der Werksangaben angenommen. Der Hersteller gibt eine Ladezeit von 5 Stunden für eine vollständige Ladung an. Da der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFe<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) des BEV nur eine nutzbare Kapazität von 11,7 kWh bietet (vgl. Tab. 3-2) ergibt sich ein Wert von 25,6 Minuten pro geladener kWh.

$$\text{Beladerate} \left[ \frac{\text{min}}{\text{kWh}} \right] = \frac{\text{Ladedauer für vollständige Ladung} [\text{min}]}{\text{nutzbarer Kapazität} [\text{kWh}]}$$

Die ermittelten Daten zu Verbrauch und Beladung für Elektromobil vom Typ Mia werden in Kapitel 3.3 mit den Nutzungsdaten der konventionell betriebenen Flotte des IWF kombiniert. Diese Nutzungsdaten werden im Folgenden ausgewertet.

### 3.2 Datengrundlage der konventionell betriebenen Flotte des IWF

Die Grundlage für die Analyse der Nutzungsdaten sind die Fahrtenbücher drei konventionell betriebener baugleicher Volkswagen Polo V 1.6 TDI Bluemotion Trendline (Technische Daten im Anhang 2, Tabelle 0-3), welche dem IWF als betriebliche Fahrzeugflotte dienen und im Rahmen des FGG Projektes durch Elektromobile ausgetauscht werden. Der betrachtete Zeitraum der Fahrtenbücher umfasst für die Fahrzeuge mit den amtlichen Kennzeichen BS-TU343 und BS-TU345 jeweils ein Jahr (Juli 2011 bis Juni 2012) und für das Fahrzeug mit dem amtlichen Kennzeichen BS-TU107 einen Zeitraum von 11 Monaten (August 2011 bis Juni 2012).

<sup>7</sup> Die Verwendung linearer Funktionen für Verbrauch und Beladung dient in dieser Arbeit einer groben Abschätzung des Fahrzeugverhaltens und sollte durch reale Messwerte ausgetauscht werden, sobald diese vorliegen.

Den Fahrtenbüchern können die folgenden Angaben entnommen werden:

- Start- und Zieldatum inklusive Angabe der Uhrzeit
- Die Länge der zurückgelegten Strecke in km
- Die Dauer der Fahrt
- Start- und Zieladresse
- Fahrzeugführer und mitgefahrene Personen
- Zweck der Fahrt

Zunächst wurde die Qualität der Daten geprüft. Alle eingetragenen Fahrten<sup>8</sup> wurden auf Plausibilität überprüft und nicht schlüssige Einträge entfernt – beispielsweise doppelt eingetragene Fahrten oder Fahrten, welche nicht an dem Ort starten, an dem das Fahrzeug bei der vorausgegangenen Fahrt abgestellt wurde. Dabei konnten 1007 der 1078 dokumentierten Fahrten als gültig ermittelt werden. Die zurückgelegte Distanz bzw. Laufleistung der 1007 validen Fahrten beträgt insgesamt 41516,7 km und verteilt sich wie folgt auf die drei Fahrzeuge:

<b>BS-TU107</b>		<b>BS-TU343</b>		<b>BS-TU345</b>
353 Fahrten	12697,3 km	367 Fahrten	12998,3 km	287 Fahrten
				15821,1 km

### 3.3 Definition des Untersuchungsgegenstandes

Die Kombination der Fahrtenbucheinträge der ICE Flotte mit den ermittelten Werten zu Verbrauch und Beladung eines BEV vom Typ Mia (vgl. 3.1) ermöglicht nun die Ermittlung des Verbrauchs und der daraus resultierenden benötigten Zeit zum vollständigen Beladen der Batterie für jeden der 1007 gültigen Fahrtenbucheinträge der ICE Flotte (vgl. 3.2). Darauf basierend kann jeder Be- und Entladevorgang zeitlich in den Tagesverlauf eingeordnet werden. Diese zeitliche Einordnung ermöglicht zum einen Aussagen über das Nutzerverhalten und zum anderen kann eine erste Abschätzung über das Zusammenwirken von Solarstrom und der Beladung von Elektromobilen vorgenommen werden. Dabei wurde für jeden der 1007 validen Fahrtenbucheinträge die gleiche Herangehensweise zu Grunde gelegt:

Zunächst wurden alle Start- und Ziel-Adressen, welche sich in unmittelbarer Nähe des IWF befinden, als Standort einer Ladesäule gekennzeichnet, mit welcher der Mia beladen werden könnte. Da mit Gewissheit nur davon ausgegangen werden kann, dass eine kompatible Ladeinfrastruktur an diesem Standort vorhanden ist, beschränkt sich dadurch die maximale Reichweite des Fahrzeuges im Sommer/Winter auf 60/40 km zu einem Ziel und 60/40 km zurück zur Ladesäule (vgl. 3.1).

<sup>8</sup> Eine Fahrt ist zu verstehen als jede Bewegung eines Fahrzeugs von einem Start- zu einem Zielort.

Im nächsten Schritt erfolgte die Differenzierung eines Jahres in Sommer- und Wintermonate um dem temperaturabhängigen Verbrauch des Mia gerecht zu werden. Die Grundlage hierfür bilden Klimadaten für Hannover, vgl. Abb. 3-1. Aus dem Diagramm ist abzulesen, dass sich die durchschnittliche Temperatur in den Monaten Dezember bis Februar nur leicht über der Nullmarke befindet. Für die Monate Dezember bis Februar ("Winter") könnte der Mia also maximal Strecken von 80 km bewältigen und in den Monaten März bis November ("Sommer") maximal 120 km. Diese sehr grobe Differenzierung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Gesamtverbrauch eines Fahrzeugs und sollte durch reale Messwerte ersetzt werden, sobald diese vorliegen.

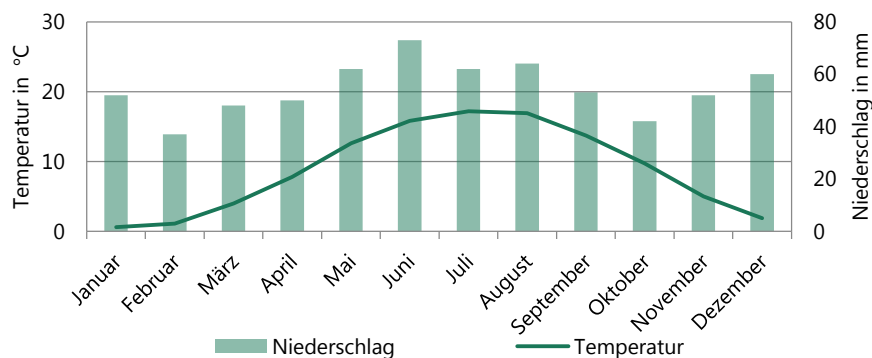


Abbildung 3-1: Klimadiagramm Hannover, nach (Sträßer 1999)

Alle Fahrtenbucheinträge der konventionellen Flotte, welche die maximalen Reichweiten des Mia im Sommer bzw. Winter übersteigen, wurden daraufhin entfernt, da diese Fahrten nicht von einem Elektromobil wie dem Mia nach Kapitel 3.1 übernommen werden könnten. Es bleiben 697 valide Fahrtenbucheinträge übrig. Das Ergebnis dieser Annahme ist, dass insgesamt 69% der mit der konventionellen Flotte durchgeführten Fahrten von einer Flotte aus Elektromobilen wie dem Mia übernommen werden könnten. Die Laufleistung der konventionellen Flotte könnte zu 20% übernommen werden. An dieser Stelle ist festzustellen, dass der vollständige Austausch der konventionellen Flotte des IWF durch Elektromobile vom Typ Mia, bei einem gleich bleibendem Nutzungsverhalten, nicht realisierbar wäre. 31% der Fahrten müssten von Fahrzeugen mit einem anderen Antrieb gedeckt werden – z.B. PHEV oder ICE. Dies ist bei der Einsatzplanung der einzuführenden Flotte zu berücksichtigen.

Wie sich die Anzahl der Fahrten und die Laufleistung in km auf die einzelnen Fahrzeuge aufteilen, wird in Abbildung 3-2 sichtbar.

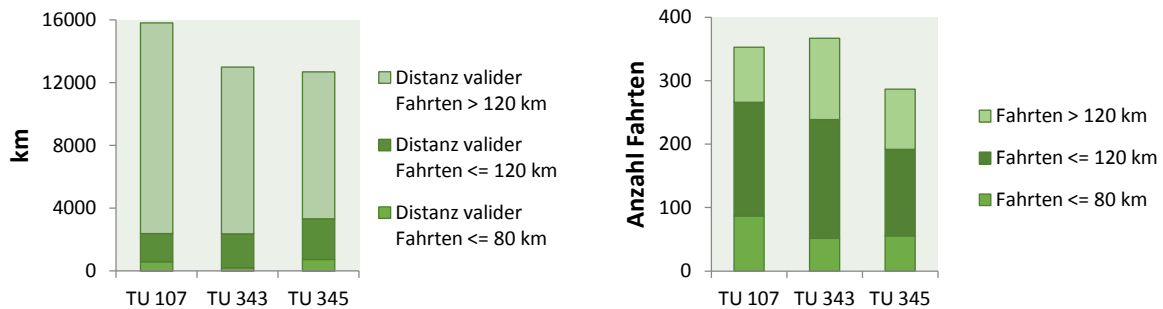


Abbildung 3-2: Distanz und Anzahl valider Fahrten der IWF-Flotte nach Fahrzeugen

Die verbleibenden 697 validen Fahrtenbucheinträge, welche von wurden im Folgenden hinsichtlich dieser Fragestellungen untersucht:

- An welchem Tag und um wie viel Uhr startet das Fahrzeug?
- Wie lange fährt das Fahrzeug?
- An welchem Tag und um wie viel Uhr kehrt das Fahrzeug zur Ladesäule zurück?
- Wie viel kWh hat das Fahrzeug verbraucht?
- Wie lange braucht das Fahrzeug um die verbrauchten kWh zu laden?
- An welchem Tag und in welchem Zeitraum lädt das Fahrzeug, wenn es direkt nach der Fahrt an die Ladesäule angeschlossen wird?

Um diese Fragen zu klären wurden die Fahrtenbucheinträge täglich von 00:00 bis 23:45 Uhr mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten ausgewertet. Die Auswertung erfolgte in der Tabellenkalkulationssoftware Excel. Um die Vorgehensweise zu verdeutlichen soll ein Beispieltag kurz erläutert werden:

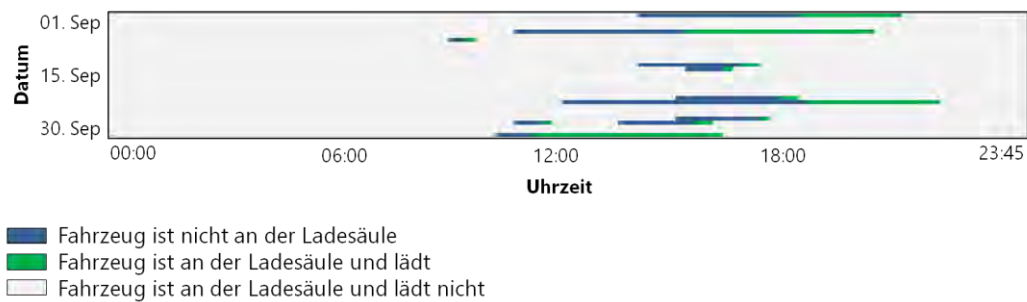
Ein Mia mit dem Nutzungsmuster des Fahrzeugs BS-TU107 fährt am 01.09.2011 um 13:57:36 Uhr von der Ladestation des IWF zu der Adresse Berliner Brücke in 38448 Wolfsburg. Das Fahrzeug kehrt am 01.09.2011 um 17:48:19 Uhr zurück. Damit war es unter Berücksichtigung der bei der Auswertung verwendeten zeitlichen Auflösung von 15 Minuten, drei Stunden und 45 Minuten unterwegs. Es ist 64,6 km gefahren und hat dabei 6,2985 kWh verbraucht (Sommerverbrauch des Mia). Der Ladestand des Akkus ist bei 48% und das Fahrzeug muss etwa 161 Minuten (= 11 Intervalle á 15 Minuten) an der Ladesäule beladen werden um einen Akku-Füllstand von 100% zu erreichen. Dafür würde es am 01.09.2011, von 18:00:00 bis 20:30:00 Uhr beladen werden.

Mit dieser Vorgehensweise wurden alle gültigen Fahrtenbucheinträge im Betrachtungszeitraum bearbeitet. Als Resultat dieser Betrachtungsweise kann für jedes Fahrzeug zu jedem Tag von Juli 2011 bis September 2012 mit einer Genauigkeit von 15 Minuten festgestellt werden ob ein Mia mit dem gleichen Nutzungsprofil

- nicht an der Ladesäule stehen und damit eine Dienstfahrt machen würde,
- an der Ladesäule stehen und laden würde oder
- an der Ladesäule stehen und nicht beladen werden würde.

Abbildung 3-3 zeigt diese drei Zustände im Tagesverlauf für den gesamten Monat September 2011 für einen Mia mit dem Nutzungsprofil des BS-TU107.

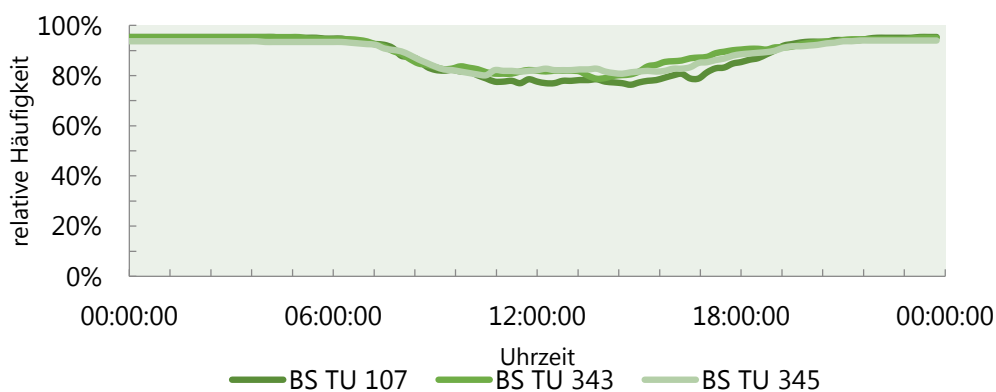
**BS-TU107 - Monatsverlauf September 2011**



*Abbildung 3-3: Monatsverlauf für das Fahrzeug BS-TU107 im September 2011*

Auffällig ist die geringe Nutzung im Monatsverlauf. Im gesamten Monat September 2011 wäre das Fahrzeug zu 4% unterwegs, zu 3% würde es beladen und zu 93% der gesamten Zeit des Monats stünde es an der Ladesäule. Dieser Monatsverlauf ist kein Ausnahmefall sondern stellt die Regel der ausgewerteten Nutzungsprofile dar. Betrachtet man alle gültigen Fahrtenbucheinträge der drei konventionellen Fahrzeuge und wendet diese auf den Mia an, stellt man fest, dass sie im gesamten Zeitraum zu ca. 90% der Zeit ungenutzt an der Ladesäule parken würden.

Betrachtet man die relative Häufigkeit (Abb. 3-4) der Zeitpunkte im Tagesverlauf, an denen Fahrzeuge vom Typ Mia mit den Nutzungsprofilen der konventionellen IWF-Flotte im Betrachtungszeitraum an der Ladesäule des IWF stehen können, so fällt auch hier direkt die geringe Nutzungsintensität auf.



*Abbildung 3-4: Relative Häufigkeit der Uhrzeiten, an denen ein Fahrzeug an der Ladesäule des IWF steht und beladen werden könnte*

Die Fahrzeuge wären in 95% der Fälle von 23:00 bis 05:00 Uhr morgens an der Ladesäule. Im Tagesverlauf wäre ein Anstieg der Nutzungshäufigkeit zur Mittagszeit zu erkennen, während diese gegen Abend hin wieder abnehmen. Dieser Verlauf wäre für alle Fahrzeuge vergleichbar. Der Tagesverlauf der relativen Häufigkeit zur Verfügung stehender Ladezeitpunkte gibt einen ersten Hinweis auf die Möglichkeiten den Ladebedarf der Batterie mit PV-Energie zu decken. In den Mittagsstunden, in denen die Sonne am höchsten steht, ist die Flotte mit geringerer Häufigkeit anzutreffen als in den Abend- und Nachtstunden.

Nachdem nun der Untersuchungsgegenstand - eine Elektromobilflotte mit technischen Eigenschaften eines Mia MiAmore mit den Nutzungsprofilen der konventionell betriebenen Flotte des IWF - definiert wurde, kann auf dieser Basis in Kapitel 4 eine Ökobilanz zur Bewertung der ökologischen Einflüsse verschiedener Strombereitstellungsszenarien durchgeführt werden. Zunächst findet jedoch eine Einführung in die in der Ökobilanz verwendete Sachbilanzdatenbank *ecoinvent 2.2* statt.

### 3.4 Sachbilanzdatenbank *ecoinvent 2.2*

Die Erstellung von Sachbilanzen bedarf einer großen Datenmenge zur Spezifizierung des zu bewertenden Systems, da eine ganzheitliche Ökobilanz auch über die Grenzen des bekannten Systems (Foreground) hinausblicken sollte in das Hintergrund-System (Background). Daher ist eine Verallgemeinerung von sich wiederholenden Prozessen notwendig um alle benötigten Vorketten berücksichtigen zu können (Frischknecht 2009). Um also den Aufwand einer Ökobilanz überschaubar zu halten, wurden Datenbanken mit standardisierten Grunddaten entwickelt, die typische Sachbilanzen z.B. für Energieversorgung, Maschinen, Gebäude, Transportmittel zur Verfügung stellen. Solche Daten werden auf nationaler und internationaler Ebene bereitgestellt um beispielsweise Produktionsbedingungen von Zulieferländern zu berücksichtigen.

Das Schweizer Zentrum für Ökoinventare (*ecoinvent* Zentrum) hat im Jahr 2003 die Datenbank *ecoinvent* veröffentlicht, welche mittlerweile die größte und meistgenutzte ihrer Art ist. In der Version *ecoinvent 2.2* befinden sich mehr als 4000 Datensätze mit Sachbilanzdaten zu Energie, Materialien, Abfall, Transporten, Elektronik uvm. Ermittelt wurden die Daten in Kooperationen mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft (Frischknecht 2009). Während die Nutzung der Datenbank kostenpflichtig ist, kann die Dokumentation aller Datensätze kostenfrei im Internet eingesehen werden und gibt Aufschluss über alle Annahmen, welche zur Ermittlung der Umweltwirkungen getroffen wurden. Die Datenbank bietet die standardisierten Prozesse in Form von UNIT- und RESULT-Prozessen an, welche mit oder ohne Angabe der benötigten Infrastruktur bereitgestellt werden (Schmidt und Schorb op. 1995). UNIT-Prozesse stellen Daten auf Prozessebene zur Verfügung, so dass nur die für den Prozess benötigten Materialien und Dienstleistungen als In- und Outputs berücksichtigt

werden. RESULT-Prozesse aggregieren die Daten des Prozesses und aller dazugehörigen Vorketten in Form von Entnahmen aus der Umwelt und Emissionen in die Umwelt. Die Funktionsweise dieser unterschiedlichen Prozesstypen, soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden:

Betrachtet man beispielsweise den Transport eines Produktes von der Produktion zum Vertriebszentrum kann man die Bereitstellung des Transportfahrzeugs mit einbeziehen (mit Infrastruktur) oder vernachlässigen (ohne Infrastruktur). Wählt man dafür den RESULT-Datensatz "transport, lorry 7.5 – 16t EURO5 [RER]" (ecoinvent 2010) erhält man auf Basis der Annahmen des ecoinvent Zentrums aggregierte Informationen zu allen Elementarflüssen, beginnend bei Entnahme aus der Umwelt und endend bei der Emission in die Umwelt. Wählt man für den gleichen Datensatz die UNIT-Variante werden nur die für das Fahren benötigten In- (Treibstoff) und Outputs (Abgase) berücksichtigt. Hier können zusätzlich eigene Annahmen und Modifikationen des Prozesses einfließen. Weiß man beispielsweise um den geringeren Verbrauch des eingesetzten Fahrzeugs, kann man diesen im UNIT-Datensatz anpassen, da RESULT-Prozesse immer auf allgemeinen Durchschnittswerten basieren, die der Dokumentation des Datensatzes entnommen werden können.

Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze der Datenbank ecoinvent 2.2, werden in der nun folgenden Ökobilanz an geeigneter Stelle erwähnt und erläutert. Die Berichte zu den Datensätzen befinden sich auf der beiliegenden CD.

## 4 Ökobilanz verbrauchsgerecht eingesetzter Photovoltaik-Energie

Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit der ökologischen Bewertung einer mit Elektrofahrzeugen vom Typ Mia MiAmore betriebenen Fahrzeugflotte, welcher das Nutzungsprofil der konventionell betriebenen Fahrzeugflotte des IWF zu Grunde liegt (siehe 3.3). Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt auf verschiedenen Möglichkeiten der Strombereitstellung von Solarstrom in der Nutzungsphase. Unter Zuhilfenahme der Software *Umberto NXT LCA* (siehe 2.6.3) und der Datenbank *ecoinvent 2.2* (siehe 3.4) wird eine vergleichende Ökobilanz (siehe 2.6.1) verschiedener Szenarien durchgeführt.

### 4.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

Das Ziel dieser Ökobilanz ist der Vergleich der Umweltwirkungen des Betriebes einer mit Elektrofahrzeugen vom Typ Mia MiAmore betriebenen Fahrzeugflotte bei unterschiedlichen Strombereitstellungsszenarien. Für den Vergleich wird das Nutzungsprofil der konventionell betriebenen Fahrzeugflotte des IWF zu Grunde gelegt. Im Rahmen der Untersuchung werden drei Szenarien unterschiedlicher Strombereitstellung miteinander verglichen:

- (1)** Szenario DMix12 (siehe 4.3.2.1): Die Strombereitstellung in der Nutzungsphase mit dem nach *ecoinvent*-Methodik ermittelten deutschen Strom-Mix aus dem Jahre 2012 als Referenz.
- (2)** Szenario PVNetz (siehe 4.3.2.2): Die Strombereitstellung in der Nutzungsphase durch einen maximal nutzbaren Anteil an Solarstrom aus PVA. Dieser maximale Anteil wird zunächst mit den in Kapitel 3.3 analysierten Nutzungsprofilen ermittelt. Die PV-Energie zur Deckung des maximalen Anteils wird durch einen Solarstrom-Tarif eines Energieversorgers bereitgestellt. Von der Modellierung einer PVA wird bewusst abgesehen, da die Installation einer PVA zur alleinigen Deckung des Strombedarfs der Elektromobilflotte auf Grund der geringen Nutzungsintensität der Flotte überdimensioniert wäre (vgl. 3.3). Über 90% des gesamten erzeugten Solarstroms könnten nicht genutzt werden und müssten einem anderen zu bewertenden Verbraucher zugeführt werden, um eine korrekte ökologische Bewertung der installierten Solaranlage vornehmen zu können. Die Modellierung eines Solar-Strom-Tarifs berücksichtigt hingegen anteilig den Umwelteinfluss der Bereitstellung einer PVA auf Basis der eingesetzten Strommengen, welche für den Betrieb der Elektromobilflotte notwendig sind. Der restliche Anteil zur Deckung des Strombedarfs in der Nutzungsphase wird über den im Szenario DMix12 ermittelten Strom-Mix gedeckt.
- (3)** Szenario PVInsel (siehe 4.3.2.3): In Kombination mit einem geeigneten Speicher-System für eine vom Stromnetz unabhängige Versorgung soll der Strombedarf in der Nutzungsphase komplett aus Solarstrom gedeckt werden. Hier kommt wie im Szenario



PVNetz ein Solarstrom-Tarif zum Einsatz. Zusätzlich wird ein geeigneter Batteriespeicher modelliert.



*Abbildung 4-1: Zu bewertende Szenarien der Ökobilanz*

Die Ergebnisse des Vergleichs sollen zeigen, welche Potenziale für die Reduzierung von Umwelteinflüssen durch die Bereitstellung von Photovoltaik-Strom anstatt herkömmlich erzeugten Stroms entstehen können. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen die Einsatzplanung der im Rahmen des FGG-Projektes am IWF einzuführenden Elektromobil-Flotte unterstützen.

Die Ökobilanz-Studie wird durchgeführt auf Basis der Auswertung der Fahrtenbucheinträge von Juli 2011 bis Juni 2012 der ICE Flotte des IWF, welche durch Verwendung technischer Daten des Mia in Kapitel 3.3 für eine Elektromobilflotte vom Typ Mia aufbereitet wurden.

In allen Szenarien wird außerdem der komplette Lebensweg nur eines Fahrzeuges betrachtet. Diese Vorgehensweise bietet sich an, da auf Grund der in Kapitel 3.3 ermittelten geringen Nutzungsintensität der Fahrzeuge am konkreten Beispiel der IWF-Flotte ein Elektrofahrzeug vom Typ Mia den Nutzungsgewohnheiten des IWF in Kombination mit einem ICE oder REEV gerecht werden könnte. Eine reine Elektromobilflotte vom Typ Mia könnte wie in Kapitel 3.3 ermittelt nur 20% der gesamten Laufleistung übernehmen.

Allen Szenarien wird das Fahrzeugmodell Mia MiAmore mit einer für Elektrofahrzeuge dieser Klasse üblichen Lebensdauer in Ökobilanzen von 150.000 km zu Grunde gelegt (Del Duce et al. 2013). Die Lebenszyklusabschnitte der Rohstoffbereitstellung, Produktion, Distribution und dem Lebensende sind in allen Szenarien identisch. Diese Phasen werden nur grob modelliert, da der Fokus der Studie auf dem Vergleich der Strombereitstellung in der Nutzungsphase liegt. Der Verbrauch in der Nutzungsphase wird auf Basis der in Kapitel 3.1 ermittelten Verbrauchswerte für Winter und Sommer berechnet und angewandt auf die Lebensdauer von 150.000 km. Der so ermittelte Gesamtverbrauch wird gedeckt von den unterschiedlichen Strombereitstellungs-Szenarien in der Nutzungsphase.

Die Systemgrenzen umfassen alle Lebenszyklusabschnitte von der Wiege bis zur Bahre (cradle-to-grave) inklusive der Transportprozesse zwischen den Phasen. Von der Bereitstellung der Materialien zur Produktion eines Elektrofahrzeuges inkl. Motor und Batterie, deren Transport zur Produktion des Fahrzeuges, dem Transport des Fahrzeuges zum IWF, der Strombereitstellung in der Nutzungsphase sowie dem Transport zur Entsorgung und die Entsorgung selbst werden alle Prozesse modelliert. Die Infrastruktur zum Beladen des Fahrzeugs und die Instandhaltung des Fahrzeuges sind nicht Bestandteil der Untersuchung. Für das Szenario PVMix wird anteilig der Lebenszyklus der eingesetzten PV-Anlagen mit einbezogen. Im Szenario PVInsel wird zusätzlich der gesamte Lebenszyklus eines Speichersystems betrachtet und bewertet (Abb. 4-2), weil die durchschnittliche Lebensdauer von Speichersystemen die Lebensdauer der modellierten Flotte nur geringfügig übersteigt (vgl. 4.2.3.3). Die Ergebnisse der zusätzlichen Lebenszyklen werden jeweils der Nutzungsphase zugeordnet.

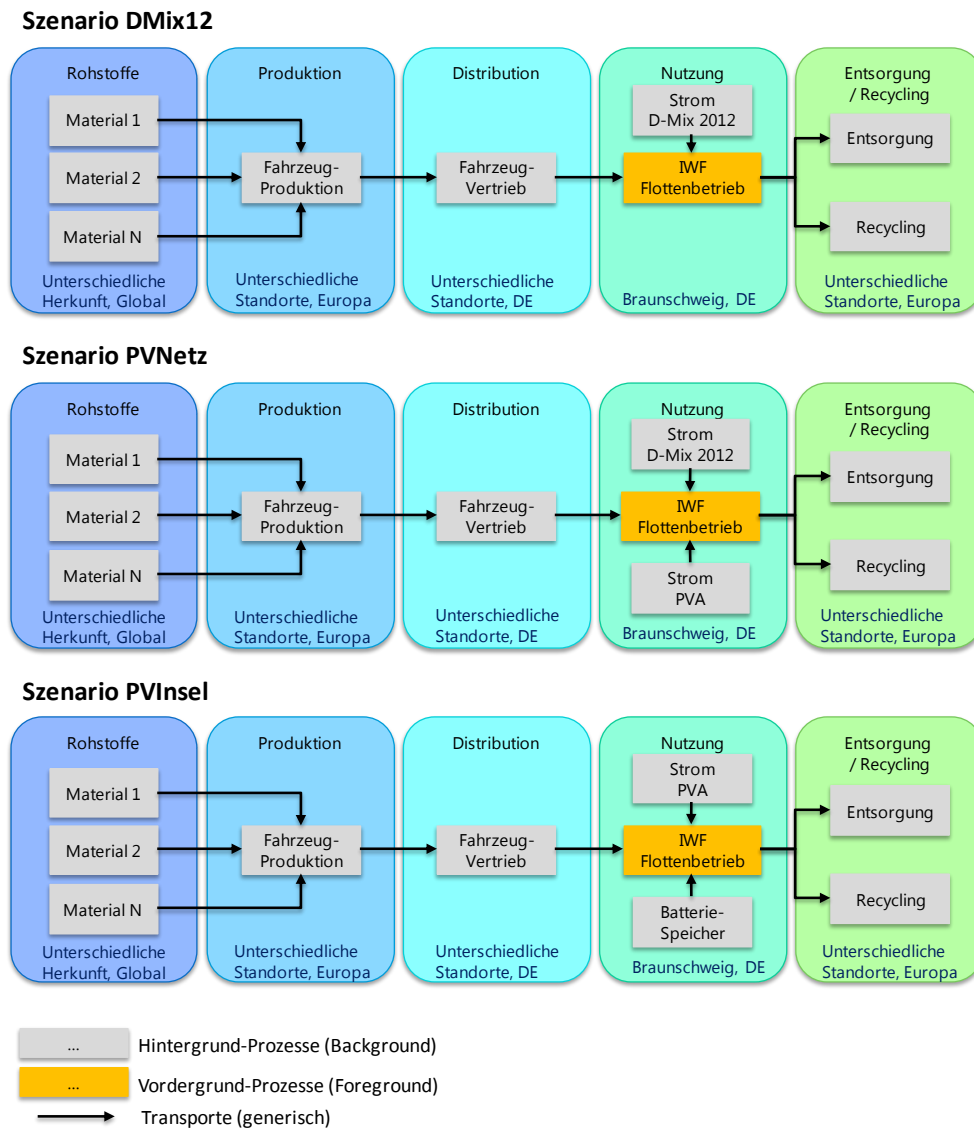


Abbildung 4-2: Systemgrenzen der Strombereitstellungsszenarien

Die funktionelle Einheit ist die Bereitstellung von Mobilität im Sinne einer betrieblichen Fahrzeugflotte am IWF für Strecken von bis zu 120 km im Sommer bzw. 80 km im Winter bei einer durchschnittlichen Laufleistung von 15.000 km im Jahr. Jeglicher Ressourcenverbrauch und alle Emissionen von Stoffen in die Umwelt, welche in den Lebenswegen der Szenarien anfallen, werden auf den Lebensweg eines Fahrzeugs umgelegt und ermöglichen einen nach Lebensphasen differenzierten Vergleich des Umweltinventars. Die Bewertung des Umweltinventars erfolgt mit der CML-Methode (vgl. 2.5.1). Sie wird im FGG-Projekt als Bewertungsmethode für alle durchgeführten Ökobilanz-Studien verwendet und soll daher auch hier zum Einsatz kommen. Die Methode CML 2001 umfasst insgesamt 50 Wirkungskategorien, welche sich im Wirkungszeitraum unterscheiden. In dieser Arbeit wird, wie in den meisten Ökobilanzen üblich, von einem Wirkungszeitraum von 100 Jahren ausgegangen. Die in dieser Arbeit betrachteten Wirkungskategorien können Tab. 4-1 entnommen werden.

Tabelle 4-1: Betrachtete Wirkungskategorien nach CML 2001

Wirkungskategorie	Indikator	Einheit
<b>Erschöpfung abiotischer Ressourcen</b>	-	Kg Antimon Äquivalente
<b>Boden Ökotoxizität</b>	TAETP 100a	Kg 1,4-DCB-Äquivalente
<b>Aquatische Seewasser Toxizität</b>	MAETP 100a	Kg 1,4-DCB Äquivalente
<b>Sedimentäre Seewasser Toxizität</b>	MSETP 100a	Kg 1,4-DCB Äquivalente
<b>Aquatische Süßwasser Toxizität</b>	FAETP 100a	Kg 1,4-DCB Äquivalente
<b>Sedimentäre Süßwasser Toxizität</b>	FSETP 100a	Kg 1,4-DCB Äquivalente
<b>Human Toxizität</b>	HTP 100a	Kg 1,4-DCB Äquivalente
<b>Photochemische Oxidation</b>	High NO <sub>x</sub> POPC	Kg Ethylen Äquivalente
<b>Stratosphärischer Ozonabbau</b>	ODP 25a	Kg CFC-11 Äquivalente
<b>Treibhauspotenzial</b>	GWP 100a	Kg CO <sub>2</sub> Äquivalente
<b>Überdüngungspotenzial</b>	generisch	Kg PO <sub>4</sub> Äquivalente
	europ. Durchschnitt	Kg NO <sub>x</sub> Äquivalente
<b>Versauerungspotenzial</b>	europ. Durchschnitt	kg SO <sub>2</sub> Äquivalente

In Kapitel 5 erfolgt eine Diskussion der wichtigsten Annahmen der Ökobilanz-Studie. Die erzielten Ergebnisse sind nur im Spiegel der eigenen Annahmen und Berechnungen sowie der verwendeten Literaturwerte, Daten und Datensätze gültig. Ein Vergleich mit anderen Systemen kann nur auf Basis gleicher oder ähnlicher Voraussetzungen erfolgen.

## 4.2 Sachbilanz

In diesem Abschnitt der Ökobilanz werden die Inventare der einzelnen Phasen der auf den unterschiedlichen Szenarien basierenden Lebenszyklen ermittelt. Dazu werden die unterschiedlichen Szenarien in der Software *Umberto NXT LCA* (vgl. 2.6.3) modelliert. Die Grundlage der Sachbilanz bildet eine Kombination bestehender Datensätze der Datenbank *ecoinvent 2.2* (vgl. 3.4) mit Literaturwerten, eigenen Annahmen und Berechnungen. Bevor die Ergebnisse in Form von Umweltwirkungen präsentiert werden, sollen die zur Modellierung des Systems verwendeten Daten, Datensätze, Annahmen und Berechnungen eingeführt werden. Dazu wird im Folgenden jede Phase des Lebenszyklus eines Mia einzeln betrachtet. Eine Übersicht der drei modellierten Prozesssysteme findet sich in Anhang 3, Abbildungen 0-1 bis 0-4.

### 4.2.1 Rohstoffe und Produktion

Die Produktion des Mia und die dafür benötigten Rohstoffe wurden unter Zuhilfenahme des UNIT-Prozesses „passenger car, electric, LiMn2O4, city car, at plant [RER]“ (inkl. Infrastruktur) modelliert. Dieser Datensatz enthält die benötigten Materialien, deren Transporte zur Fabrik, die Bereitstellung der Fabrik, sowie die benötigten Hilfs- und Betriebsstoffe zur Fertigung eines BEV mit einem Lithium-Ionen-Akkumulator (Spielmann et al. 2007). Alle Input-Materialien und –Prozesse wurden durch RESULT-Prozesse als Vorketten bis hin zur Rohstoffentnahme aus der Umwelt erfasst. Der UNIT-Prozess wurde auf die Daten des Mia skaliert. Die Berücksichtigung der eingesetzten Batterie ist besonders wichtig, da die Batterie in der Produktion des Elektrofahrzeugs den größten Umwelteinfluss trägt<sup>9</sup>. Das Gewicht der Batterie wird gemäß den Fahrzeugdaten des Mia mit 150 kg angenommen (mia electric 2012). Alle übrigen Materialien wurden auf Grundlage des Verhältnisses der Materialien des ursprünglichen UNIT-Prozesses auf das Fahrzeuggewicht des Mia ohne Batterie linear skaliert (vgl. Tabelle 4-2). Die Mengen der in der Produktion eingesetzten Hilfs- und Betriebsstoffe wurden nicht angepasst, da beispielsweise der Grundenergiebedarf einer Maschine in der Fertigung nicht bekannt ist und eine lineare Skalierung wie beim eingesetzten Material nicht sinnvoll ist.

---

<sup>9</sup> Siehe dazu weiterführende Literatur in Tabelle 0-2 im Anhang 1.

Tabelle 4-2: Anpassung des UNIT-Datensatzes "passenger car, electric LiMn2O4, city car, at plant [RER]"

Input-Material	UNIT-Datensatz		modifizierter Datensatz
	Gewicht [kg]	% vom Gesamtgewicht	Gewicht [kg]
reinforcing steel, at plant [RER]	385,02	39,92%	265,48
sheet rolling, steel [RER]	250,66	25,99%	172,84
battery, LiIo, rechargeable, prismatic, at plant [GLO]	-	-	150,00
section bar rolling, steel [RER]	94,05	9,75%	64,85
electric motor, electric vehicle, at plant [RER]	70,00	7,26%	48,27
steel, low-alloyed, at plant [RER]	45,87	4,76%	31,63
polyethylene, HDPE, granulate, at plant [RER]	38,55	4,00%	26,58
polypropylene, granulate, at plant [RER]	22,70	2,35%	15,65
synthetic rubber, at plant [RER]	20,43	2,12%	14,09
flat glass, uncoated, at plant [RER]	13,95	1,45%	9,62
polyvinylchloride, at regional storage [RER]	7,41	0,77%	5,11
wire drawing, copper [RER]	4,68	0,49%	3,23
copper, at regional storage [RER]	4,68	0,49%	3,23
zinc, primary, at regional storage [RER]	2,73	0,28%	1,88
alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant [RER]	1,93	0,20%	1,33
chromium, at regional storage [RER]	1,11	0,12%	0,77
nickel, 99.5%, at plant [GLO]	0,65	0,07%	0,45
<b>Gesamtgewicht ohne Batterie</b>	964,42	100,00%	665,00
<b>Gesamtgewicht Mia mit Batterie</b>	-	-	<b>815,00</b>

## 4.2.2 Distribution

Der für die Produktion verwendete Datensatz „passenger car, electric, LiMn2O4, city car, at plant [RER]" (inkl. Infrastruktur) beschreibt ein europäisches Mittel eingesetzter Materialien, Hilfs- und Betriebsstoffe. Damit ist der Produktionsstandort des Fahrzeuges geographisch nicht eindeutig zuzuordnen. Für den Transport des Fahrzeuges von der Produktion zum Vertriebsstandort werden daher 500 km Transport auf Schienen und 50 km Lkw-Transport auf Straßen angenommen. Die Auslieferung des Fahrzeuges zum IWF wird mit einer Fahrt von 40 km unter Berücksichtigung des deutschen Strom-Mix 2012 angenommen (vgl. Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Angenommene Transportwege in der Phase Distribution

Transportmittel	Distanz [km]	Verwendeter Datensatz
Transportzug	500	transport, freight, rail [RER]
Lastkraftwagen	50	transport, lorry 7.5-16t, EURO5 [RER]
Mia MiAmore	40	D-Mix 2012 (vgl. 4.2.3.1)

### 4.2.3 Nutzungsphase

In der Nutzungsphase wird auf Basis der angenommenen Lebensdauer von 150.000 km der gesamte Stromverbrauch in der Nutzungsphase eines Mia Fahrzeuges berechnet. Die Grundlage für diese Berechnungen sind die in Kapitel 3.1 ermittelten Verbrauchswerte für sommerliche und winterliche Verhältnisse. Die Analyse der Fahrzeugflotte hat eine Verteilung der Laufleistung von 81% „Sommerverbrauch“ und 19% „Winterverbrauch“ ergeben. Die daraus resultierenden Gesamtstromverbräuche in der Nutzungsphase eines Mia sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: Gesamtstromverbrauch eines Mia MiAmore in der Nutzungsphase

	Verbrauch [kWh/100 km]	Stromverbrauch im Lebenszyklus [kWh]
<b>Sommer (81%)</b>	9,750	11851,41
<b>Winter (19%)</b>	14,625	4160,39
<b>Gesamt</b>	-	<b>16011,80</b>

In der Nutzungsphase kommen nun die unterschiedlichen Szenarien zur Strombereitstellung zum Einsatz. Diese werden im Folgenden nacheinander spezifiziert.

#### 4.2.3.1. Szenario DMix12

Im Szenario DMix12 wird der Stromverbrauch von 16011,80 kWh in der Nutzungsphase ausschließlich vom deutschen Stromnetz bzw. dem deutschen Strom Mix im Jahr 2012 gestellt. Der Mia wird an der Ladesäule des IWF mit Strom auf Niederspannungsebene (230 V) beladen. Die Verluste, durch die Transformation zwischen den verschiedenen Spannungsebenen bis hin zum Stromerzeuger müssen bei der Modellierung daher berücksichtigt werden. Der ecoinvent 2.2-UNIT-Datensatz "electricity, low voltage, at grid [DE]" (inkl. Infrastruktur) berücksichtigt dies auf Niederspannungsebene und führt über die Mittel- und Hochspannungsebene hin zum Datensatz "electricity mix [DE]", vgl. Abb. 4-3 (Frischknecht et al. 2007).

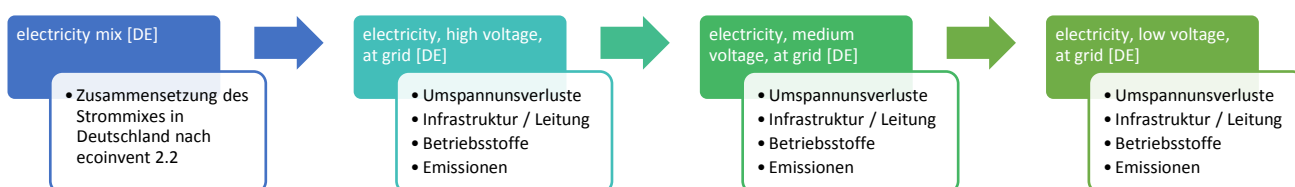


Abbildung 4-3: Struktur des UNIT-Datensatzes "electricity, low voltage, at grid [DE]" nach ecoinvent 2.2

Der UNIT-Datensatz "electricity mix [DE]" mit Infrastruktur stellt die Anteile der unterschiedlichen Energieträger mit ihrem Anteil an der Bruttostromerzeugung für ein Jahr in Deutschland dar. Desweiteren bezieht er die Stromimporte aus anderen Ländern und deren Energieträgermix zur Bruttostromerzeugung mit ein. Der UNIT-Datensatz wurde im Rahmen dieser Arbeit aktualisiert mit Daten zur Bruttostromerzeugung und Stromimporten für das Jahr 2012 in Deutschland. Dies erfolgte gemäß der in der ecoinvent Datenbank angewandten Methodik: Verbrauchermix = Inlanderzeugung + Importmix (Frischknecht et al. 2007). Diese Methode verfolgt einen Ansatz, welcher die "[...] unmittelbare Motivation der Betreiber Strom zu produzieren [...]" (Frischknecht et al. 2007, S. 6) also den Verkauf von Elektrizität berücksichtigt. Neben der gesamten Produktion im Inland werden dabei auch die Importe berücksichtigt und zwischen im Inland verbrauchtem oder ins Ausland abgesetztem Strom wird nicht unterschieden. Diese Betrachtung berücksichtigt indirekt die Tatsache, dass die Erzeugung und der Verbrauch bzw. der Verkauf von Strom meistens unabhängig voneinander erfolgen (Frischknecht et al. 2007).

Unter Verwendung von Daten des statistischen Bundesamtes (Destatis 2013) und der AG Energiebilanzen e.V. (AGEB 2013) wurde in dieser Arbeit für 2012 ein Strom-Mix nach der ecoinvent-Methode ermittelt (vgl. Abb. 4-4, die Daten finden sich zusätzlich in Anhang 4, Tabelle 0-4) und in *Umberto NXT LCA* modelliert. Dazu wurde der UNIT-Datensatz "electricity mix [DE]" (inkl. Infrastruktur) angepasst. Die an der Strombereitstellung teilhabenden Prozesse wurden einzeln über RESULT-Datensätze erfasst. Für die Kategorie "übrige Energie" wurde der Original Datensatz "electricity mix [DE]" (inkl. Infrastruktur) angesetzt und für die Kategorie "Sonstige Länder" wurde ein europäisches Mittel mit dem Datensatz "electricity mix [RER]" (inkl. Infrastruktur) modelliert.

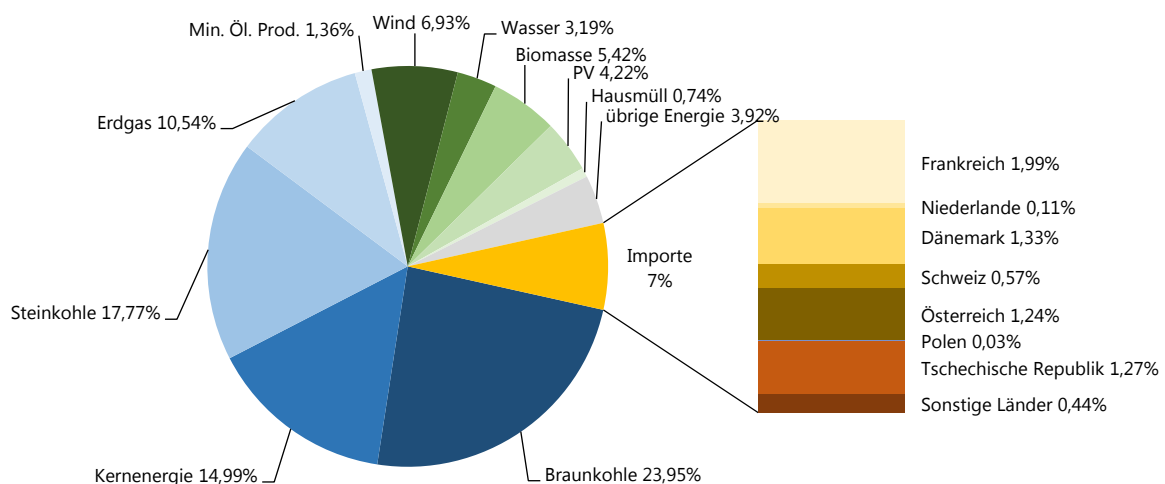


Abbildung 4-4: Bruttostromerzeugung und Stromimporte in D im Jahr 2012, nach Destatis (2013) und AGEB (2013)



#### 4.2.3.2. PVNetz

Im Szenario PVNetz wird der Stromverbrauch des Mia in der Nutzungsphase gestellt durch PV-Strom und den im DMix12 verwendeten Strom-Mix. Der Anteil des Solarstroms soll dabei maximal sein, d.h. wann immer es unter Berücksichtigung des Nutzungsprofils möglich ist mit Solarstrom zu laden, soll dies auch geschehen. Wenn der Solarstromanbieter auf Grund geringerer Strahlungsleistung  $[W/m^2]$  zu einem bestimmten Tageszeitpunkt weniger Solarstrom liefern kann, wird der restliche Bedarf durch den DMix12-Strom gedeckt. Damit wir davon ausgehen, dass insgesamt zu keiner Tageszeit ein Überangebot an Solarstrom vorhanden ist und dass jeder Abnehmer weniger Solarstrom erhält, sobald die Strahlungsleistung der Sonne sinkt. Um den maximalen Anteil des Solarstroms am Gesamtstrombedarf ermitteln zu können, wurden die in Kapitel 3.3 kombinierten Fahrzeugdaten und Nutzungsprofile mit dem täglichen Angebot an Solarstrom abgeglichen, welches dafür zunächst ermittelt werden musste:

Um die im Netz zur Verfügung stehende PV-Energie im Tagesverlauf zu quantifizieren, wurden monatliche Durchschnittswerte der direkten Solarstrahlung (vgl. Kapitel 2.3.1) verwendet. Dazu wurden Daten der Einstrahlungsdatenbank Climate-SAF für PVGIS (European Union 2013) verwendet. So konnten für jeden Monat durchschnittliche Werte der Direktnormalstrahlung (DNI) der Sonne ermittelt werden. Die Werte werden im Tagesverlauf im 15-Minuten-Takt von der Datenbank bereitgestellt. Der gewählte Standort zur Ermittlung der DNI-Werte ist der Standort der Ladesäule (vgl. Abb. 4-5), eine dort installierte Anlage zur Erzeugung von PV-Strom würde gen Süden unter einem Anstellwinkel von  $30^\circ$  ausgerichtet werden. Die auf diesen Annahmen erhobenen Daten befinden sich auf der beiliegenden CD.

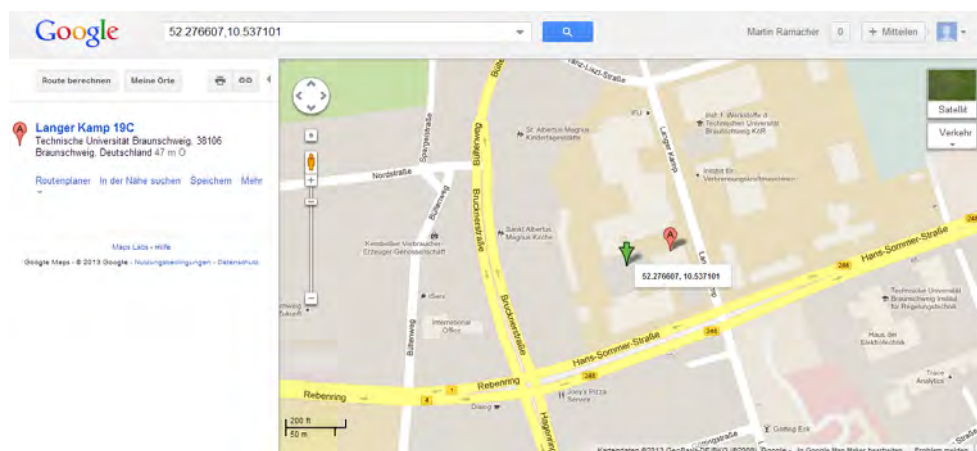


Abbildung 4-5: Standort der Ladesäule und Position der berechneten Solarstrahlungsdaten



Die maximale Strahlungsleistung in  $\text{W/m}^2$  wird in dieser Arbeit gleichgesetzt mit der maximalen Einspeiseleistung von PV-Anlagen und mit dem maximalen Angebot an PV-Energie im Strom-Netz. Das Maximum der direkten Sonneneinstrahlung konnte mit  $405 \text{ W/m}^2$  im April identifiziert werden. Basierend auf dieser Annahme erfolgt die Quantifizierung im Netz verfügbaren PV-Stroms im Tagesverlauf für jeden Tag des betrachteten Zeitraums (Juli 2011- Juni 2012). Beispielsweise beträgt das Angebot an solarer Leistung an einem August-Tag um 12:30 Uhr etwa 84% des maximal Möglichen.

Die im 15-Minuten-Takt zur Verfügung stehenden Informationen über den Status der Elektromobil-Flotte werden im Folgenden an die für jeden Monat quantifizierte verfügbare PV-Energie im Tagesverlauf gekoppelt. Das Ziel ist die Ermittlung eines PV-Nutzungsgrades. Dieser Nutzungsgrad soll die verbrauchsgerecht zum Laden der Mia-Flotte eingesetzte PV-Energie widerspiegeln. Für alle Ladevorgänge im Betrachtungszeitraum der drei Fahrzeuge, welche in 3.3 ermittelt wurden, wird dazu überprüft ob und wie viel PV-Energie zur Verfügung steht. Der Anteil der zum Laden benötigten Energie, welcher nicht mit PV-Energie gedeckt werden kann, wird vom restlichen Strom-Mix aufgefangen. So ergibt sich für jeden Ladevorgang ein Verhältnis aus genutzter PV-Energie und genutzter Rest-Energie. Innerhalb jeden Monats findet daraufhin eine Gewichtung auf Basis des Anteils eines jeden Ladevorgangs an der Laufleistung des Monats statt. Die Summe der gewichteten Anteile ergibt einen Monatsanteil. Die Monatsanteile werden wiederum gewichtet mit ihrem Anteil an der gesamten Laufleistung des betrachteten Jahres. Die Summe dieser gewichteten Teile ergibt einen Jahresfaktor und damit einen Faktor, welcher repräsentativ für ein Fahrzeug ist. Da die Fahrzeuge ebenfalls eine unterschiedliche Laufleistung haben, werden die ermittelten Faktoren nochmals gewichtet mit dem Anteil, den ein jedes Fahrzeug an der gesamten Laufleistung aller Fahrzeuge im betrachteten Zeitraum hat. Das Ergebnis ist ein Faktor, der einen über das Nutzungsverhalten aller Fahrzeuge mit dem jahreszeitlich bedingten PV-Energie-Angebot im Netz ermittelten Nutzungsgrad der eingesetzten PV-Energie angibt (vgl. Abb. 4-6).

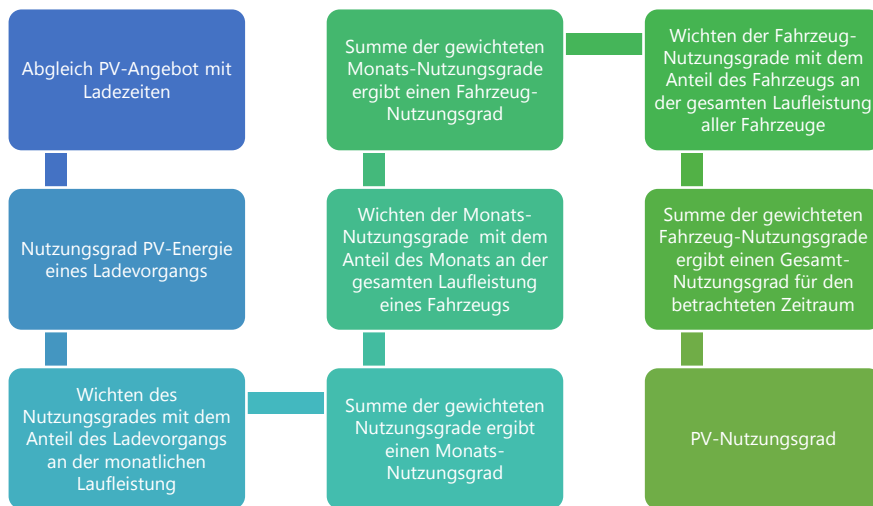


Abbildung 4-6: Schema zur Ermittlung des PV-Nutzungsgrades

Die Auswertung der Daten hat einen PV-Nutzungsgrad von 0,3 ergeben. Dies bedeutet, dass 30% des gesamten Strombedarfs der Nutzungsphase eines BEV vom Typ Mia mit dem auf Basis der Nutzungsprofile der ICE Fahrzeugflotte, mit Energie aus Photovoltaik-Anlagen gedeckt werden kann. Die restlichen 70% werden vom deutschen Strom-Mix 2012 bereitgestellt.

Basierend auf der maximal einsetzbaren Menge Solarstrom von 30% des Gesamtstrombedarfs in der Nutzungsphase wird zur Modellierung in der Sachbilanz der RESULT-Datensatz „electricity production mix, photovoltaic, at plant [DE]“ (mit Infrastruktur) verwendet und mit 4803,5 kWh berücksichtigt. Dieser beschreibt die Bereitstellung von Strom aus PVA. Dabei werden die unterschiedlichen Zelltechnologien (vgl. 2.3), welche in Deutschland verwendet werden, berücksichtigt und der Datensatz enthält aggregierte Informationen der gesamten Lebenswege der eingesetzten Anlagen (Jungbluth 2007). Die restlichen 70% (11208,3 kWh) werden modelliert mit dem im Szenario DMix12 modellierten deutschen Strom-Mix 2012.

#### 4.2.3.3. PVInsel

Im Szenario PVInsel wird der Gesamtverbrauch des Mia gestellt durch PV-Anlagen in Kombination mit einem Stromspeicher. Ausgehend von der geringen Nutzungsintensität (vgl. 3.3) wird davon ausgegangen, dass ein geeignet dimensionierter Speicher genug Sonnenenergie speichern und diese im Bedarfsfall bereitstellen kann. Zunächst stellt sich die Frage nach der zu modellierenden Batterietechnologie, welcher bei Inselsystemen und Eigenverbrauchssystemen mit Stromspeichern große Bedeutung zukommt. Aufgrund eines guten Kosten/Nutzen Verhältnisses sind die derzeit am häufigsten eingesetzten Batterien Bleiakumulatoren (Retzbach 2008). Die durchschnittliche Lebensdauer von Akkumulatoren

verschiedenster Typen liegt bei etwa 10 Jahren und damit liegen nach Mertens (2013) die höchsten Kosten eines Inselsystems beim Akkumulator. Die Entwicklung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Li-Ion) wird durch die Elektrifizierung des Mobilitätssektors jedoch stark vorangetrieben und wird langfristig auch in PV-Inselsystemen Bleiakkumulatoren ablösen (Braun und Landau 2011). Die Energiedichte von Li-Ion-Akkus ist um ein vielfaches höher, die Selbstentladungsrate geringer und der einsetzbare Temperaturbereich größer (Retzbach 2008). Die Lebensdauer von Li-Ion-Akkus kann bei geringen Entladetiefen mehr als 10.000 Ladezyklen betragen (GWL Power 2011). Die Produkt-Roadmap Lithium-Ionen Batterien 2030 des Fraunhofer ISI prognostiziert höhere Energiedichten, festere und mehr Ladezyklen, sinkende Preise und damit wettbewerbsfähige Alternativen zu Bleiakkumulatoren für stationäre Li-Ion-Systeme bis 2030 (Thielmann et al. 2012).

Da Li-Ion-Akkumulatoren in naher Zukunft die bevorzugte Speichertechnologie für Inselsysteme sein werden wird im Szenario PVInsel also ein Li-Ion-Akku modelliert. Desweiteren ist ein Li-Ion-Speichersystem dazu in der Lage, den gesamten Lebenszyklus des Mia auf Basis der Nutzungsprofile des IWF zu decken, da die Mehrzahl der Fahrten Kurzstrecken sind und dies zu geringen Entladetiefen des Speichers und damit zu einer hohen Lebensdauer führt.

Der ecoinvent 2.2-Datensatz „battery, LiIo, rechargeable, prismatic, at plant [GLO]“ beinhaltet im Result-Format alle Materialien, Prozesse und Transporte und die dazugehörigen Vorketten die zur Bereitstellung von einem kg eines Li-Ion-Akkus notwendig sind. Zur Modellierung des Speichersystems wird lediglich Material zur Bereitstellung des Akkus verwendet, da dies den größten Einfluss hat und der Einfluss der restlichen Komponenten eines Speichersystems vernachlässigt werden kann (Buchert et al. 2011). Damit muss nun eine Menge in kg für den Datensatz ermittelt werden. Bei der Dimensionierung eines geeigneten Akkumulators müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden: Ein Mia mit einem maximalen Ladebedarf der Auto-Batterie von 11,7 kWh wird im Extremfall komplett über den Stromspeicher beladen, welcher im Tagesverlauf genug Sonnenenergie speichern könnte. Um eine hohe Akkulebensdauer zu erreichen sollte der Akku-Ladestand nicht unter 30% fallen (Retzbach 2008). Daraus ergibt sich eine benötigte Kapazität von 16,71 kWh für einen geeigneten Stromspeicher. Bei einer für Li-Ion-Speicher minimal anzunehmenden Energiedichte, unter Berücksichtigung von Systemverlusten von 85 Wh/kg (Retzbach 2008) werden insgesamt 197 kg benötigt.

In der Nutzungsphase des PVInsel Szenarios wird der RESULT-Datensatz „battery, LiIo, rechargeable, prismatic, at plant [GLO]“ (inkl. Infrastruktur) mit 197 kg berücksichtigt. Hinzu kommt die Entsorgung der Batterie, welche ebenfalls mit 197 kg im Datensatz "disposal, Li-ions batteries, mixed technology [GLO]" (inkl. Infrastruktur) berücksichtigt wird. Durch die beiden RESULT-Datensätze kann der komplette Lebenszyklus eines geeigneten

Stromspeichers für den Inselbetrieb erfasst werden (Hischier et al. 2007). Dabei wird angenommen, dass der modellierte Speicher ausschließlich zum Laden von Solarstrom und zum Beladen von Fahrzeugbatterien genutzt wird. Die Lebensdauer des Speichers wurde mit der Lebensdauer der Flotte angenommen.

#### 4.2.4 Entsorgung/ Recycling

Nach 150.000 gefahrenen km wird angenommen, dass das Fahrzeug entsorgt bzw. recycelt wird. Der *ecoinvent 2.2*-Datensatz „disposal, passenger car, electric, LiMn2O4, city car [RER]“ (inkl. Infrastruktur) beschreibt das europäische Mittel für ein Entsorgungsszenario aller Fahrzeugteile, welche nicht recycelt werden (Spielmann et al. 2007). Er basiert auf dem in der Produktionsphase eingesetzten Datensatz (vgl. 4.2.1). Das Gewicht der Batterie wird im Datensatz auf 150 kg angepasst. Die restlichen Posten des Datensatzes wurden nicht modifiziert.

Der beschriebene Lebensweg wurde für jedes Szenario in der Software *Umberto NXT LCA* modelliert und die Sachbilanz für den Lebensweg je eines Fahrzeuges berechnet. Die Ergebnisse der Sachbilanz in Form von Massen- und Energieströmen werden nicht diskutiert, da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Ermittlung der Umwelteinflüsse liegt. Die Dokumentationen der verwendeten Datensätze, die detaillierten Ergebnisse der Sachbilanz und die *Umberto NXT LCA*-Modelle sind auf der beigelegten CD zu finden. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden im folgenden Kapitel Wirkungsbilanz hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen ausgewertet.

### 4.3 Wirkungsbilanz

In diesem Teil der Ökobilanz werden die in der Zieldefinition eingeführten Wirkungskategorien (vgl. Tabelle 4-1) auf die Sachbilanz angewendet, analysiert und verglichen. Im Anschluss gilt es in Kapitel 5 die verschiedenen Szenarien qualitativ und quantitativ nebeneinander zu stellen um eine nach Wirkungskategorien differenzierte Aussage über das ökologische Potenzial der verschiedenen Szenarien treffen zu können.

#### 4.3.1 Wirkungsbilanz nach Wirkungskategorien

Die Analyse der Wirkungskategorien nach Lebensphasen identifiziert die Nutzungsphase gefolgt von der Bereitstellung der Ressourcen in fast allen Kategorien als einflussreichste Phasen (vgl. Abb. 4-6).

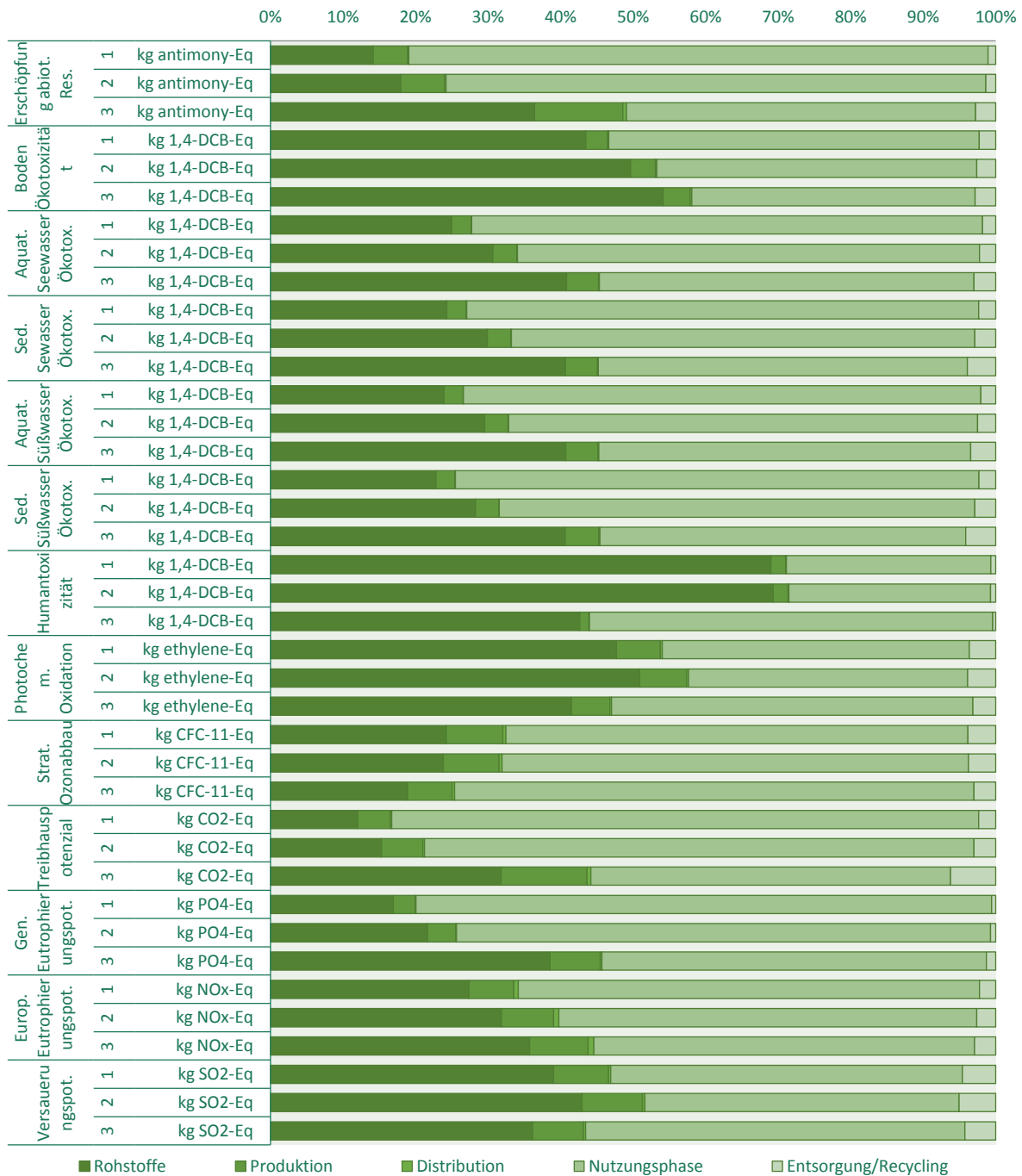


Abbildung 4-7: Prozesskettenanalyse der Sachbilanz nach Wirkungskategorien (1= DMix12, 2=PVNetz, 3=PVInsel)

Die Distribution nimmt in allen Wirkungskategorien einen verschwindend geringen Anteil ein, während die Phasen Produktion und Entsorgung/Recycling einen nicht zu vernachlässigenden Anteil einnehmen. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Nutzungsphase liegt, sich die Systeme der Szenarien nur in der Nutzungsphase unterscheiden und zudem die Nutzungsphase in den meisten Wirkungskategorien als einflussreichste Phase identifiziert wurde, wird in der Nutzungsphase eine detaillierte Analyse auf Prozessebene durchgeführt. Zu Beginn der Diskussion jeder Wirkungskategorie wird der

Anteil der Phasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling am Gesamtsystem genannt und mit der Nutzungsphase ins Verhältnis gesetzt. Die Umweltwirkungen werden je Szenario für den Lebensweg eines Fahrzeuges diskutiert. Im erläuternden Text genannte Werte, welche nicht aus den Abbildungen hervorgehen, können in der Tabelle "Auswertung der Wirkungskategorien" auf der beiliegenden CD eingesehen werden.

Die Auswertung der Wirkungskategorie **Erschöpfung abiotischer Ressourcen**<sup>10</sup> (vgl. Abb. 4-8) ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 21,29 kg Antimon Äquivalenten. Die Nutzungsphasen gehen mit

- 84,33 kg Antimon Äquivalenten (80% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 61,95 kg Antimon Äquivalenten (74% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 19,81 kg Antimon Äquivalenten (48% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

ein. Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 21% bessere und für das Szenario PVInsel eine um 61% bessere Gesamtbilanz (alle 5 Lebenszyklusabschnitte, vgl. Abb. 4-8) im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Betrachtung der Nutzungsphase auf Prozessebene zeigt, dass der deutsche Strom-Mix der ausschlaggebende Faktor dieser Wirkungskategorie ist. Die Versorgung von 30% des Gesamtenergiebedarfs durch PV-Anlagen im Szenario PVNetz verringert den Einfluss des deutschen Strom-Mix analog um 30%. Die Bereitstellung zusätzlich benötigten Solarstroms im Szenario PVNetz verursacht 2,92 kg Antimon Äquivalente (3% gemessen an Szenario DMix12).

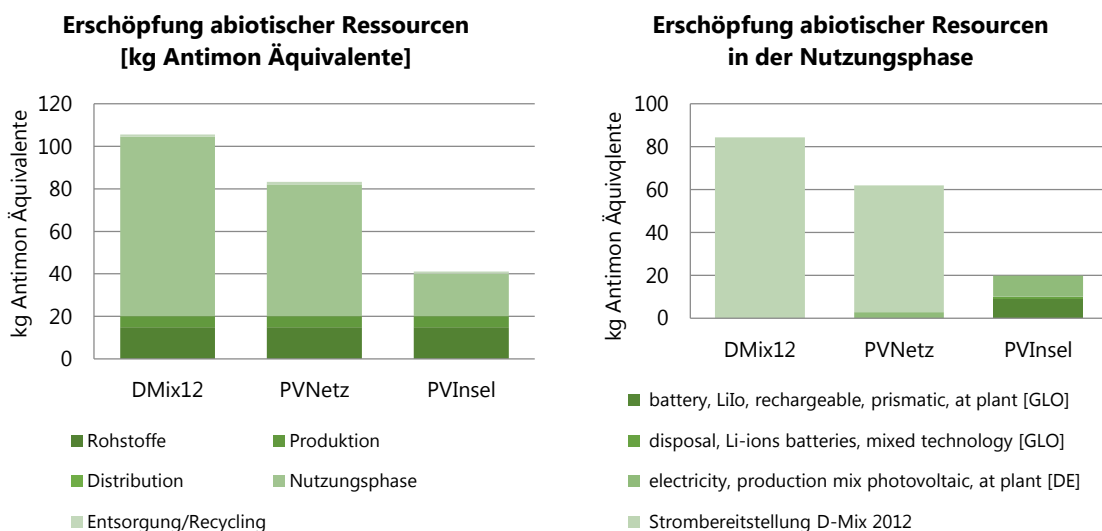


Abbildung 4-8: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Erschöpfung abiotischer Ressourcen

<sup>10</sup> Das Erschöpfungspotential mineralischer Rohstoffe und fossiler Energieträger aus der Umwelt berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen jährlicher Extraktion und den endlichen Reserven (Guinée et al. 2002).

Damit hat die Nutzungsphase im Szenario PVNetz 27% weniger Einfluss als im Szenario DMix12. Bei einem Bezug von 100% Solarstrom im Szenario PVInsel fallen 9,73 kg Antimon Äquivalente für die Bereitstellung des Solarstroms und 9,23 kg für den Batteriespeicher an. Gemessen am Szenario DMix verringert sich der Einfluss der Insel-Variante in der Nutzungsphase um 77%.

Die Berechnung Wirkungskategorie **Boden Ökotoxizität**<sup>11</sup> (vgl. Abb. 4-9) ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 2,07 kg 1,4-DCB Äquivalente. Die Nutzungsphasen erreichen Werte von:

- 2,16 kg 1,4-DCB Äquivalente (51% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 1,64 kg 1,4-DCB Äquivalente (44% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 1,33 kg 1,4-DCB Äquivalente (39% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel.

Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 12% bessere und für das Szenario PVInsel eine um 20% bessere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Analyse der Nutzungsphase auf Prozessebene identifiziert in der Wirkungskategorie Boden Ökotoxizität die Bereitstellung der Batterie im Szenario PVInsel als wirkungsärmsten Prozess. Mit 1,32 kg 1,4-DCB Äquivalenten verursacht der Lebensweg des Stromspeichers (0,92 kg 1,4-DCB Äquivalente) in Kombination mit der Bereitstellung von Photovoltaik-Strom (0,41 kg 1,4-DCB Äquivalente) nur 61% der 1,4-DCB Äquivalente wie die Strombereitstellung durch den deutschen Strom-Mix.

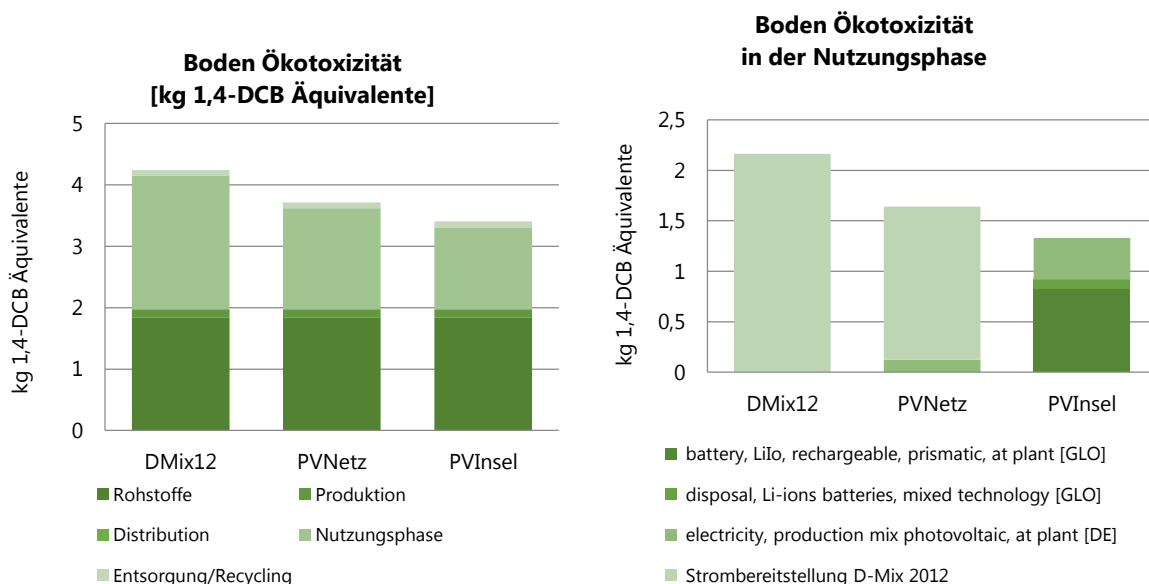


Abbildung 4-9: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Boden Ökotoxizität

<sup>11</sup> Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf terrestrische Ökosysteme (Guinée et al. 2002).

Das Szenario PV-Netz schneidet mit insgesamt 1,64 kg 1,4-DCB Äquivalenten als zweitbestes ab. Durch die Substitution von 30% des deutschen Strom-Mix durch PV-Energie, kann im Gegensatz zum Szenario DMix12 eine Verringerung von 24% erreicht werden.

Die Wirkungskategorien **aquatische und sedimentäre Ökotoxizität in Seewasser**<sup>12</sup> (vgl. Abb. 4-10) werden gemeinsam ausgewertet, da die Art der Kategorie und die Dimensionen der Auswirkung ähnlich sind. Die Betrachtung der Umweltwirkungen für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling ergeben für den betrachteten Mia Werte von 12,46 t 1,4-DCB Äquivalente im Wasser und 12,89 t 1,4-DCB Äquivalente im Sediment. Die Nutzungsphasen erreichen Werte von:

- 29,65 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (70% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12
- 30,98 t 1,4-DCB Äq. im Sediment (71% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 21,85 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (64% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz,
- 22,81 t 1,4-DCB Äq. im Sediment (64% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz,
- 13,31 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (52% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel und
- 13,35 t 1,4-DCB Äq. im Sediment (51% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel.

Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 19% (aquatisch und sedimentär) bessere und für das Szenario PVInsel eine um 39% (aquatisch) bzw. um 40% (sedimentär) bessere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix.

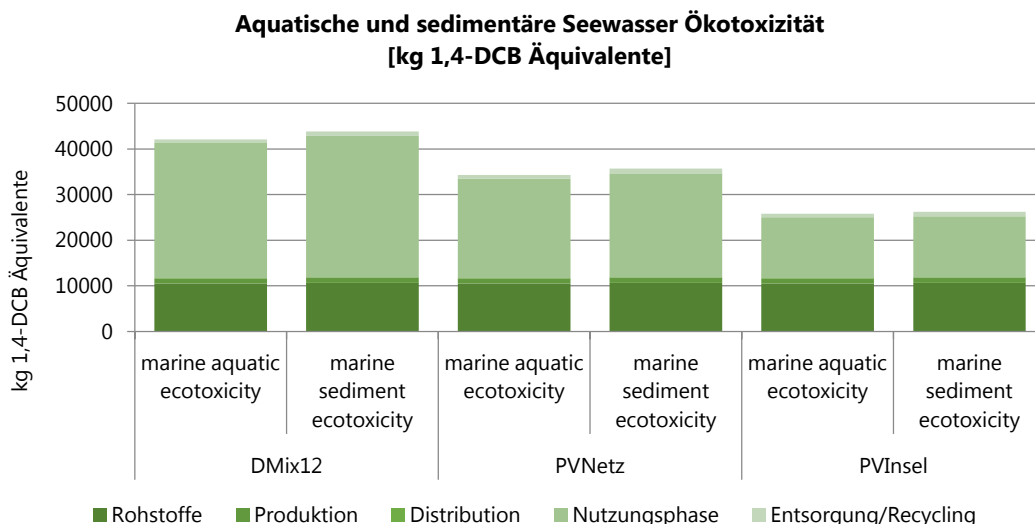


Abbildung 4-10: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Aquatische und sedimentäre Seewasser Ökotoxizität

<sup>12</sup> Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf das Sediment bzw. auf aquatische Seewasser-Ökosysteme (Guinée et al. 2002).



Die Analyse der Nutzungsphase (vgl. Abb. 4-11) identifiziert die Strombereitstellung im Szenario DMix12 als wirkungsstärksten Prozess - sowohl für die aquatische als auch für die sedimentäre Seewasser Ökotoxizität. Die Produktion und Entsorgung des Batteriespeichers führen zu 9,67 t (aquatisch) bzw. 9,59 t (sedimentär) 1,4-DCB Äquivalenten und stehen in Kombination mit der Bereitstellung von Photovoltaik-Strom (3,64 t (aquatisch) bzw. 3,76 t (sedimentär) 1,4-DCB Äquivalenten an letzter Stelle (PVInsel). Das Szenario PVNetz hat insgesamt einen mittleren Einfluss. Durch die Substitution von 30% des deutschen Strom-Mix durch PV-Energie kann im Gegensatz zum Szenario DMix12 eine Verringerung der 1,4-DCB Äquivalente um 26% (aquatisch und sedimentär) in der Nutzungsphase erreicht werden. Der Einfluss der Bereitstellung von Strom aus Photovoltaik-Anlagen liegt bei 5% (aquatisch und sedimentär) gemessen am Gesamteinfluss des Szenario PVNetz.

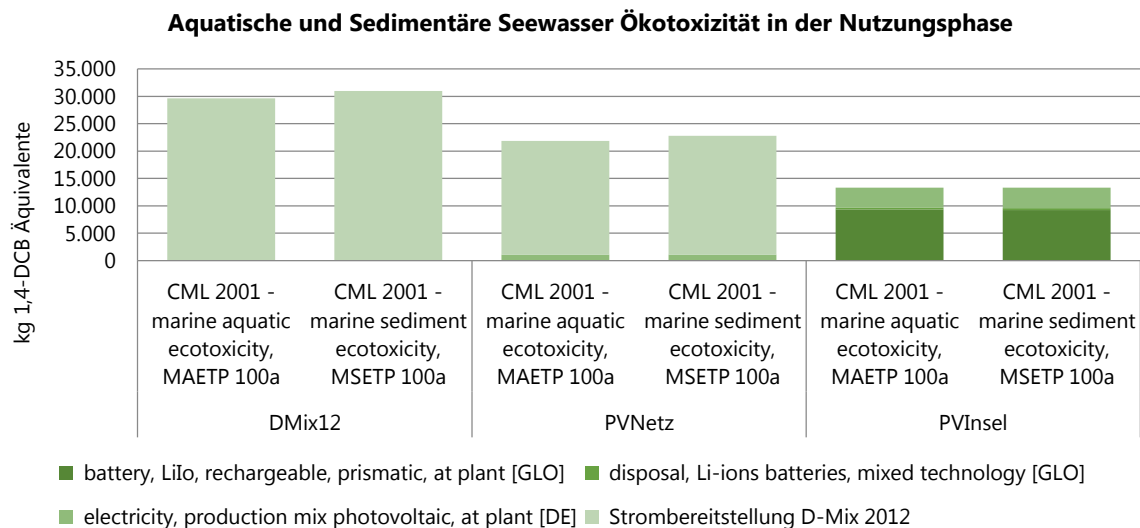


Abbildung 4-11: Aquatische und sedimentäre Seewasser Ökotoxizität in der Nutzungsphase

Die Wirkungskategorien **aquatische und sedimentäre Ökotoxizität in Süßwasser**<sup>13</sup> (vgl. Abb. 4-12) werden ebenfalls gemeinsam ausgewertet, da die Art der Kategorie und die Dimensionen der Auswirkung auch hier ähnlich sind. Die Betrachtung der Umweltwirkungen für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling ergeben für den betrachteten Mia Werte von 3,41 t 1,4-DCB Äquivalente im Wasser und 7,00 t 1,4-DCB Äquivalente im Sediment.

<sup>13</sup> Der Indikator bezieht sich auf die Wirkung toxischer Substanzen auf das Sediment bzw. auf aquatische Süßwasser-Ökosysteme (Guinée et al. 2002).

Die Nutzungsphasen erreichen Werte von:

- 8,49 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (71% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12
- 18,19 t 1,4-DCB Äq. im Sediment (72% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 6,24 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (65% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz,
- 13,34 t 1,4-DCB Äq. im Sediment (66% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz,
- 3,59 t 1,4-DCB Äq. im Wasser (51% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel und
- 7,14 t 1,4-DCB Äquivalente im Sediment (50% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel.

Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 41% (aquatisch und sedimentär) bessere und für das Szenario PVInsel eine um 15% (aquatisch) bzw. um 44% (sedimentär) bessere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix.

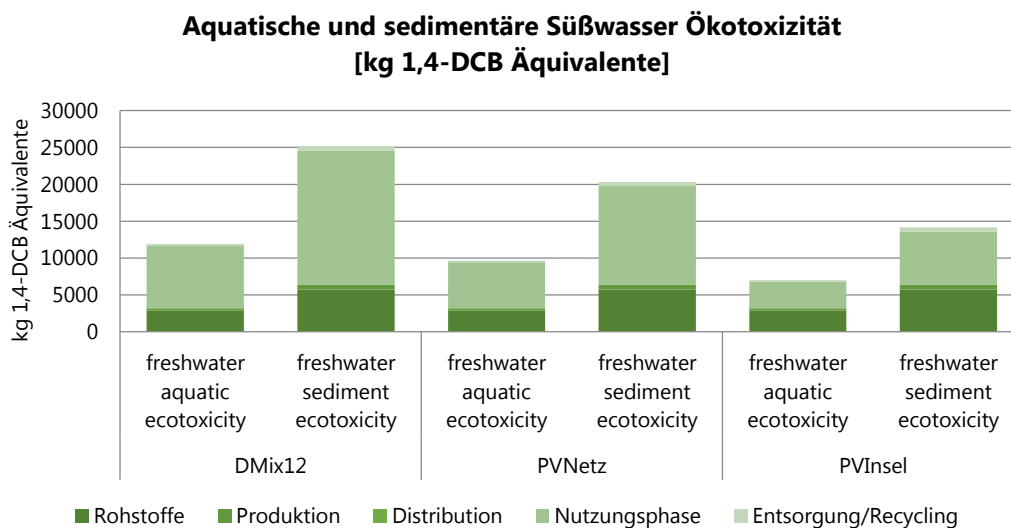


Abbildung 4-12: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Aquatische und sedimentäre Süßwasser Ökotoxizität

Eine Analyse der Nutzungsphase (vgl. Abb. 4-13) identifiziert die Strombereitstellung im Szenario DMix12 als wirkungsstärksten Prozess - sowohl für die aquatische als auch für die sedimentäre Süßwasser Ökotoxizität. Die Produktion und Entsorgung des Batteriespeichers führt zu 2,60 t aquatischen bzw. 5,11 t sedimentären 1,4-DCB Äquivalenten und steht in Kombination mit der Bereitstellung von Photovoltaik-Strom (0,98 t aquatisch bzw. 2,03 t sedimentär 1,4-DCB Äquivalente) an letzter Stelle (PVInsel). Das Szenario PVNetz hat insgesamt den zweitgrößten Einfluss. Durch die Substitution von 30% des deutschen Strom-Mix durch PV-Energie, kann im Gegensatz zum Szenario DMix12 eine Verringerung der 1,4-DCB Äquivalente um 27% (aquatisch und sedimentär) in der Nutzungsphase erreicht werden. Der Einfluss der Bereitstellung von Strom aus Photovoltaik-Anlagen liegt bei 5% (aquatisch und sedimentär) gemessen am Gesamteinfluss des Szenario PVNetz.

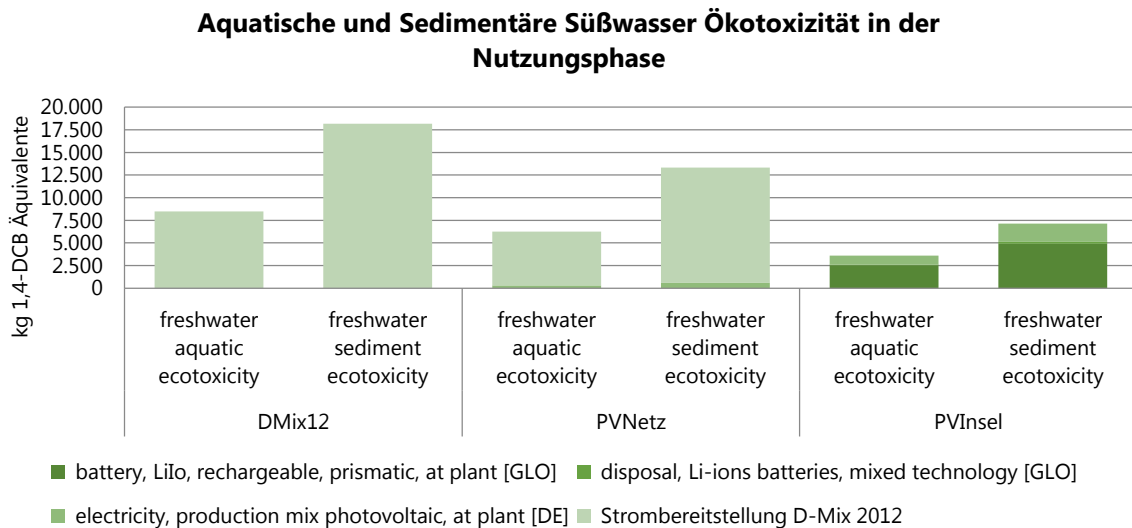


Abbildung 4-13: Aquatische und Sedimentäre Süßwasser Ökotoxizität in der Nutzungsphase

Die Berechnung der Umweltwirkungen in der Wirkungskategorie **Humantoxizität**<sup>14</sup> (vgl. Abbildung 4-14) ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 5,80 kg 1,4-DCB Äquivalenten. Die Nutzungsphasen erreichen Werte von:

- 2,27 t 1,4-DCB Äquivalente (28% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 2,24 t 1,4-DCB Äquivalente (28% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 7,26 t 1,4-DCB Äquivalente (56% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel.

Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 0,48% bessere und für das Szenario PVInsel eine um 62% schlechtere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Nutzungsphase hat im Verhältnis zu allen anderen Kategorien die geringsten Auswirkungen in der Kategorie Humantoxizität. Die Bereitstellung der Rohstoffe geht in den Szenarien DMix12 und PVNetz mit fast 70% ein, während es im Szenario PVInsel knapp 43% sind. Die Analyse der Nutzungsphase auf Prozessebene identifiziert in der Wirkungskategorie Humantoxizität die Produktion der Batterie im Szenario PVInsel als wirkungsstärksten Prozess. Mit 7,26 t 1,4-DCB Äquivalenten verursacht der Lebensweg des Stromspeichers (5,12 t 1,4-DCB Äquivalente) in Kombination mit der Bereitstellung von Photovoltaik-Strom (2,14 t 1,4-DCB Äquivalente) mehr als dreimal so viele 1,4-DCB Äquivalente wie die Strombereitstellung durch den deutschen Strom-Mix (DMix12). Das Szenario PV-Netz schneidet mit insgesamt 2,24 t 1,4-DCB Äquivalenten am einflussärmsten ab. Durch die Substitution von 30% des deutschen Strom-Mix durch PV-Energie, kann im Gegensatz zum

<sup>14</sup> Die Humantoxizität umfasst die Auswirkungen toxischer Substanzen, die in der Umwelt nachweisbar sind, auf die menschliche Gesundheit (Guinée et al. 2002).

Szenario DMix12 nur eine Verringerung des Einfluss in Höhe von knapp 2% in der Nutzungsphase erreicht werden.

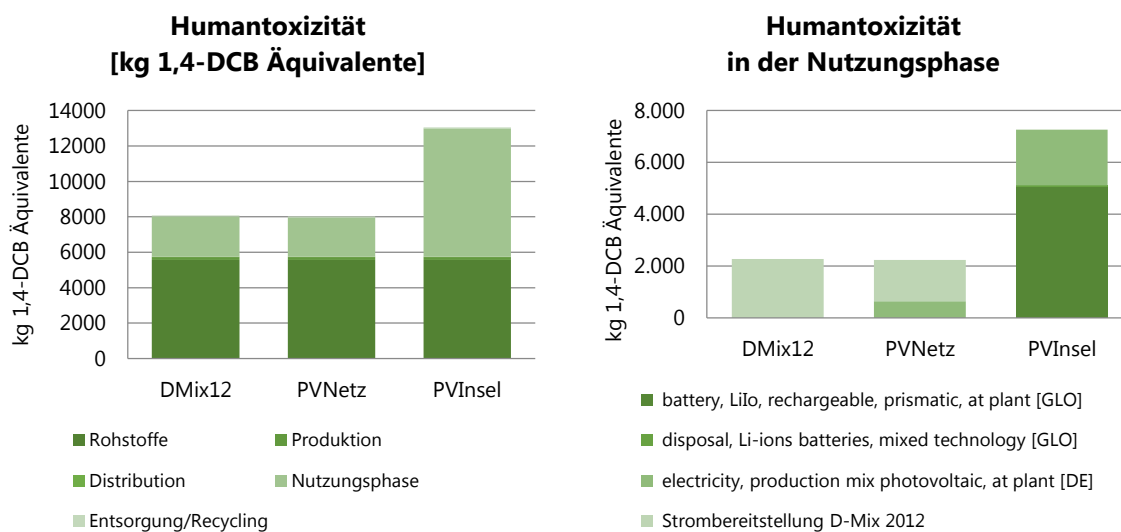


Abbildung 4-14: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Humantoxizität

Die Auswertung der Wirkungskategorie **photochemische Oxidation**<sup>15</sup> ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 1,10 kg Ethylen Äquivalenten. Die Nutzungsphasen gehen mit:

- 0,81 kg Ethylen Äquivalenten (42% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 0,69 kg Ethylen Äquivalenten (38% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 1,09 kg Ethylen Äquivalenten (50% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

ein. Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 6% bessere und für das Szenario PVInsel eine um 15% schlechtere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Analyse der Nutzungsphase auf Prozessebene identifiziert in der Wirkungskategorie photochemische Oxidation die Produktion der Batterie im Szenario PVInsel als wirkungsstärksten Prozess (vgl. Abb. 15). Mit 1,09 kg Ethylen Äquivalenten verursacht der Lebensweg des Stromspeichers (0,69 kg Ethylen Äquivalente) in Kombination mit der Bereitstellung von Photovoltaik-Strom (0,41 kg Ethylen Äquivalente) die 1,35fache Menge Ethylen Äquivalente als die Strombereitstellung durch den deutschen Strom-Mix (DMix12). Das Szenario PV-Netz schneidet mit insgesamt 0,69 kg Ethylen Äquivalenten am einflussärmsten ab. Durch die Substitution von 30% des deutschen Strom-Mix mit PV-Energie im Szenario PVNetz kann im

<sup>15</sup> Photoxidantien sind reaktive chemische Verbindungen und können die menschliche Gesundheit und Ökosysteme gefährden. Sie entstehen durch die photochemische Oxidation von flüchtigen organischen Verbindungen und CO in der Gegenwart von NO<sub>x</sub> (Guinée et al. 2002).

Gegensatz zum Szenario DMix12 eine Verringerung des Einfluss in Höhe von 15% in der Nutzungsphase erreicht werden.

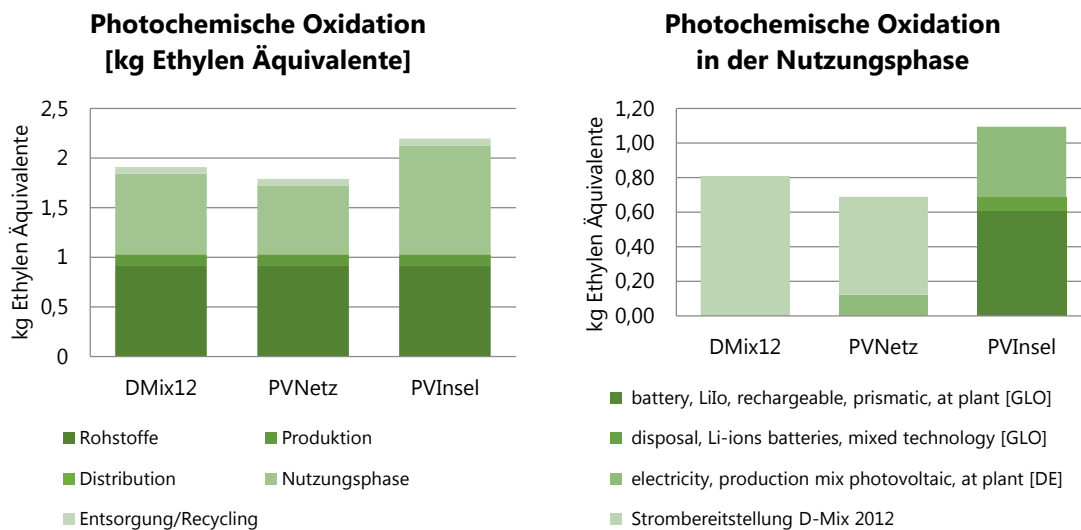


Abbildung 4-15: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Photochemische Oxidation

Die Auswertung der Wirkungskategorie **stratosphärischer Ozon-Abbau**<sup>16</sup> (vgl. Abb. 4-16) ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 0,22 g CFC-11 Äquivalenten. Die Nutzungsphasen gehen mit:

- 0,38 g CFC-11 Äquivalenten (64% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 0,39 g CFC-11 Äquivalenten (64% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 0,55 g CFC-11 Äquivalenten (72% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

ein. Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 2% schlechtere und für das Szenario PVInsel eine um 28% schlechtere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Szenarien DMix12 und PVNetz haben fast den gleichen Anteil an der Nutzungsphase, jedoch schneidet das PVNetz-Szenario um 3% schlechter ab. Dies liegt an dem höheren Einfluss durch die Bereitstellung von Solarstrom. Den geringsten Einfluss in dieser Wirkungskategorie hat daher das Szenario DMix12. Die Bereitstellung und Entsorgung des Stromspeichers fällt im Szenario PVInsel geringer aus als die Versorgung mit Photovoltaik-Strom, welcher hier dazu führt, dass das Szenario PVInsel den größten Einfluss hat.

<sup>16</sup> Der stratosphärische Ozonabbau bewirkt die Erwärmung der Erdoberfläche und ein erhöhtes Maß an für Organismen gefährlicher UV-Strahlung, verursacht durch Halogenkohlenwasserstoffe (Guinée et al. 2002).

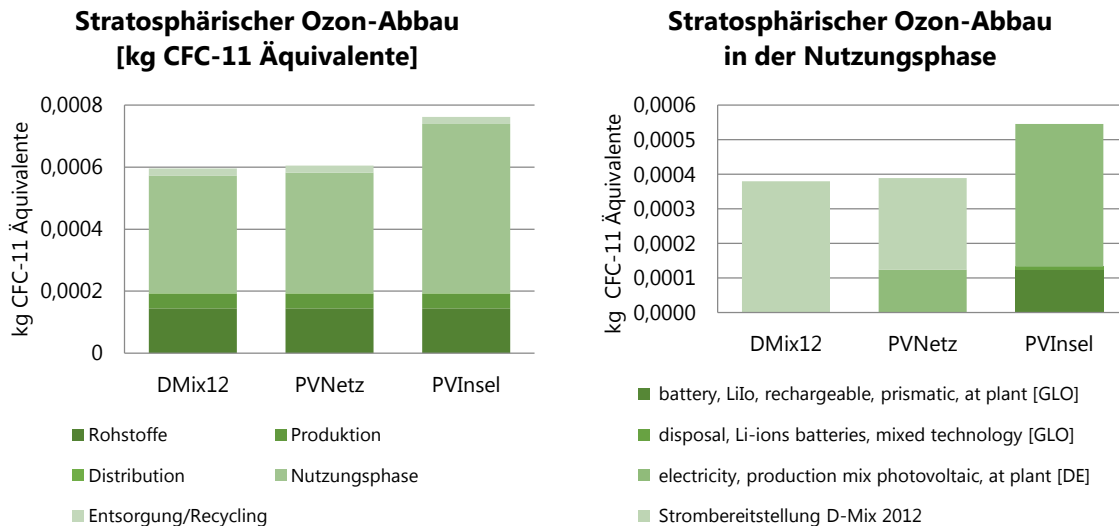


Abbildung 4-16: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Stratosphärischer Ozon-Abbau

Die Auswertung der Wirkungskategorie **Treibhauspotenzial**<sup>17</sup> (vgl. Abb. 4-17) ergibt für die Lebensphasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 2,75 t CO<sub>2</sub> Äquivalenten. Die Nutzungsphasen gehen mit:

- 11,67 t CO<sub>2</sub> Äquivalenten (81% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12,
- 8,59 t CO<sub>2</sub> Äquivalenten (76% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz und
- 2,71 t CO<sub>2</sub> Äquivalenten (50% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

ein. Damit ergibt sich für das Szenario PVNetz eine um 21% bessere und für das Szenario PVInsel eine um 62% bessere Gesamtbilanz im Verhältnis zum Szenario DMix. Die Betrachtung der Nutzungsphase auf Prozessebene zeigt, dass der deutsche Strom-Mix der ausschlaggebende Faktor dieser Wirkungskategorie ist. Die Versorgung von 30% des Gesamtenergiebedarfs durch PV-Anlagen im Szenario PVNetz verringert den Einfluss des deutschen Strom-Mix zwar um 30%, die Bereitstellung zusätzlich benötigten Solarstroms im Szenario PVNetz verursacht aber 413,42 kg CO<sub>2</sub> Äquivalente (4% gemessen an Szenario DMix12). Damit hat die Nutzungsphase im Szenario PVNetz 26% weniger Einfluss als im Szenario DMix12. Bei einem Bezug von 100% Solarstrom im Szenario PVInsel fallen 1377,85 kg CO<sub>2</sub> Äquivalente für die Bereitstellung des Solarstroms und 1329,15 kg für den Batteriespeicher an. Gemessen am Szenario DMix verringert sich der Einfluss der Insel-Variante in der Nutzungsphase um 77%.

<sup>17</sup> Der Treibhauseffekt führt zur Erwärmung der Atmosphäre und einer Änderung des Klimas, verursacht durch den Ausstoß von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> und FCKW (Quaschnig 2007).

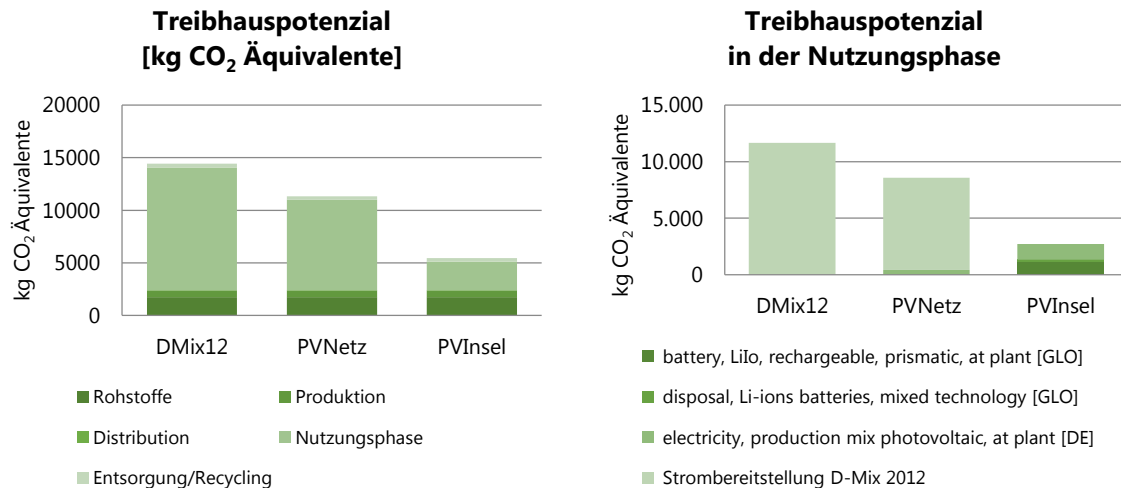


Abbildung 4-17: Ergebnisse der Wirkungsbilanz - Treibhauspotenzial

Die Wirkungskategorie **Überdüngungspotenzial**<sup>18</sup> (vgl. Abb. 4-18) kann generisch und/oder nach europäischem Durchschnitt ausgewertet werden. Die verwendeten Äquivalente unterscheiden sich hierbei. Das generische Eutrophierungspotenzial wird ausgedrückt in kg PO<sub>4</sub> Äquivalenten und der europäische Durchschnitt in kg NO<sub>x</sub> Äquivalenten. In dieser Arbeit sollen beide Möglichkeiten betrachtet werden. Für die Phasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling ergeben sich bei generischer Betrachtung 12,79 kg PO<sub>4</sub> Äquivalente und bei der Betrachtung des europäischen Durchschnitts 8,31 kg NO<sub>x</sub> Äquivalente. Die Nutzungsphasen der verschiedenen Szenarien gehen mit folgendem Wert und Anteil in den betrachteten Lebensweg ein:

- 49,25 kg PO<sub>4</sub> Äquivalente (79% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12
- 14,51 kg NO<sub>x</sub> Äquivalente (64% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12
- 35,73 kg PO<sub>4</sub> Äquivalente (74% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz
- 11,31 kg NO<sub>x</sub> Äquivalente (58% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz
- 14,45 kg PO<sub>4</sub> Äquivalente (53% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel
- 9,18 kg NO<sub>x</sub> Äquivalente (52% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

Betrachtet man die PO<sub>4</sub> Äquivalente schneidet das Szenario PVInsel 56% besser, das Szenario PVNetz 22% besser ab als das Szenario DMix. Im europäischen Durchschnitt schneidet das Szenario PVInsel ebenfalls am besten ab. Die NO<sub>x</sub> Äquivalente schlagen hier mit 23% weniger als im Szenario DMix zu Buche. Für das PVNetz Szenario hingegen ergibt sich eine Verringerung des Einflusses um 14% im Gegensatz zum Szenario DMix.

<sup>18</sup> Ein überhöhtes Niveau von Nährstoffen wie N und P in der Umwelt führt zu Verunreinigungen von Trinkwasser, schädigt die Artenvielfalt und verursacht übermäßige Biomasseproduktion (Guinée et al. 2002).

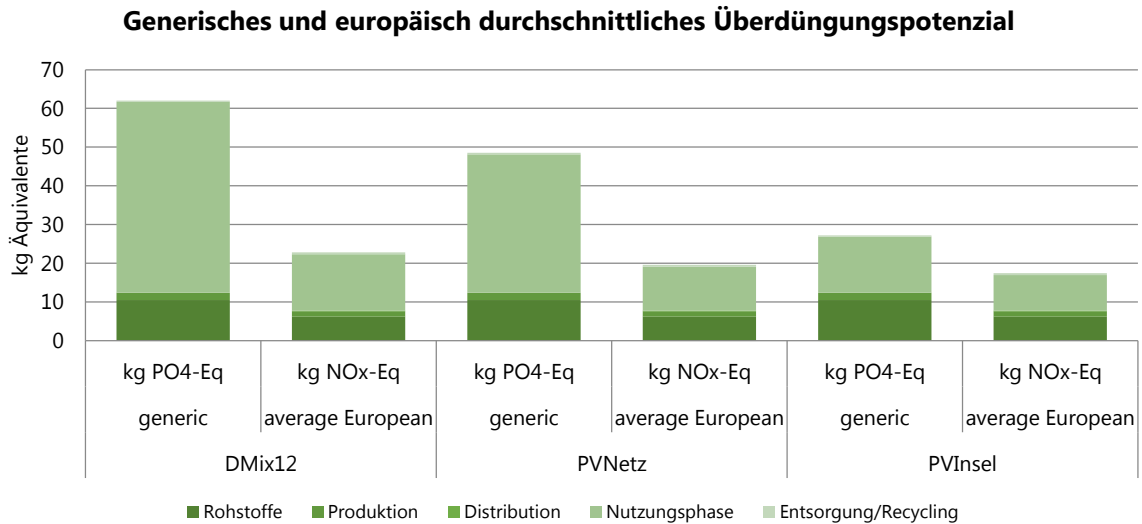


Abbildung 4-18: Ergebnisse der Wirkungsbilanz: Generisches und europ. durchschnittliches Überdüngungspotenzial

Ein Blick auf die Nutzungsphase ermittelt den deutschen Strom-Mix im Szenario DMix12 als größten Einflussfaktor des generischen Überdüngungspotenzials (vgl. Abb. 4-19). Im Szenario PVNetz kann durch eine dreißig prozentige Substitution des deutschen Strom-Mix mit PV-Anlagen eine Reduzierung der PO<sub>4</sub> Äquivalente um 27% erreicht werden, da die Bereitstellung der PV-Anlage nur eine dreiprozentige Wirkung verursacht. Im Szenario PVInsel fallen in der Nutzungsphase 69% der Wirkungsursachen in den Prozess der Batterie-Produktion. Im europäischen Durchschnitt sind es 54%. Bei absoluter Betrachtung verursachen die Bereitstellung und Entsorgung der Batterie im Szenario PVInsel 5,36 kg NO<sub>x</sub> Äquivalente. Die Bereitstellung der PVA hat im Szenario PVNetz keinen großen Einfluss, so dass dieses von der Reduktion des Verbrauchs vom deutschen Strom-Mix profitiert und ein mittleres Überdüngungspotenzial hat.

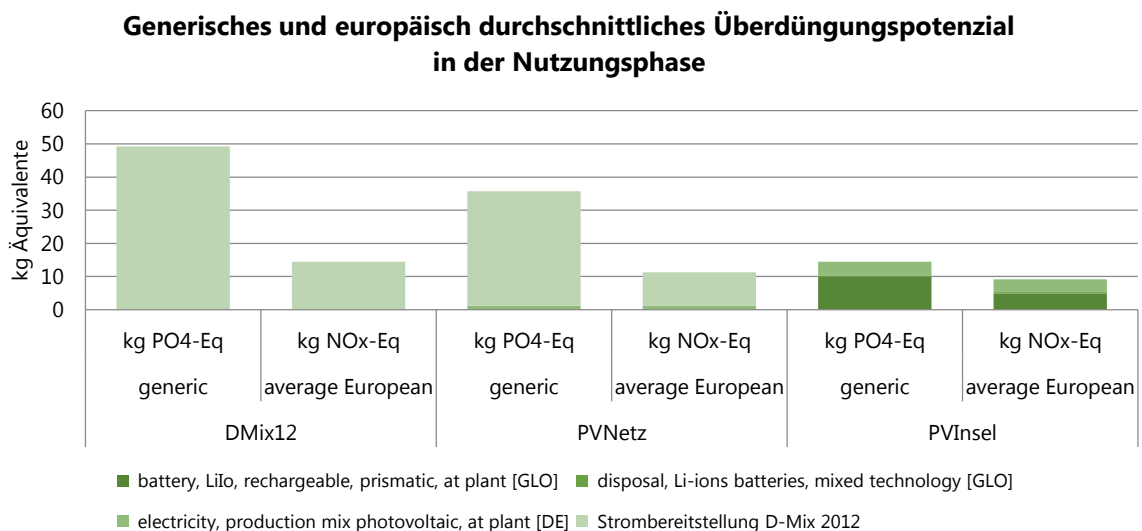


Abbildung 4-19: Überdüngungspotenzial in der Nutzungsphase



Die Ermittlung des **Versauerungspotenzial**<sup>19</sup> (vgl. Abb. 4-20) ergab im betrachteten Lebensweg aller Szenarien für die Phasen Rohstoffe, Produktion, Distribution und Entsorgung/Recycling einen Wert von 18,98 kg SO<sub>2</sub> Äquivalenten. Die Nutzungsphasen der unterschiedlichen Szenarien ergaben folgende Werte:

- 17,87 kg SO<sub>2</sub> Äquivalente (48% Anteil am Lebensweg) im Szenario DMix12
- 14,50 kg SO<sub>2</sub> Äquivalente (43% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVNetz
- 20,79 kg SO<sub>2</sub> Äquivalente (52% Anteil am Lebensweg) im Szenario PVInsel

Damit schneidet das Szenario PVInsel insgesamt als schlechtestes ab. Das Versauerungspotenzial übersteigt das des Szenarios DMix12 um 8%. Am wenigsten SO<sub>2</sub> Äquivalente verursacht das Szenario PVInsel, welches 9% weniger erzeugt als das Szenario DMix12. Ein Blick in die Nutzungsphase identifiziert die Produktion der Batterie mit 12,24 kg SO<sub>2</sub> Äquivalenten als den Prozess mit dem größten Versauerungspotenzial. Die Bereitstellung von PVA in den Szenarien PVNetz und PVInsel fallen im Verhältnis eher gering aus, was dazu führt, dass der geminderte Einsatz des deutschen Strom-Mix im Szenario PVNetz sich stärker bemerkbar macht und eine Verringerung des Versauerungspotenzial für das Szenario PVNetz bringt, welches am besten abschneidet.

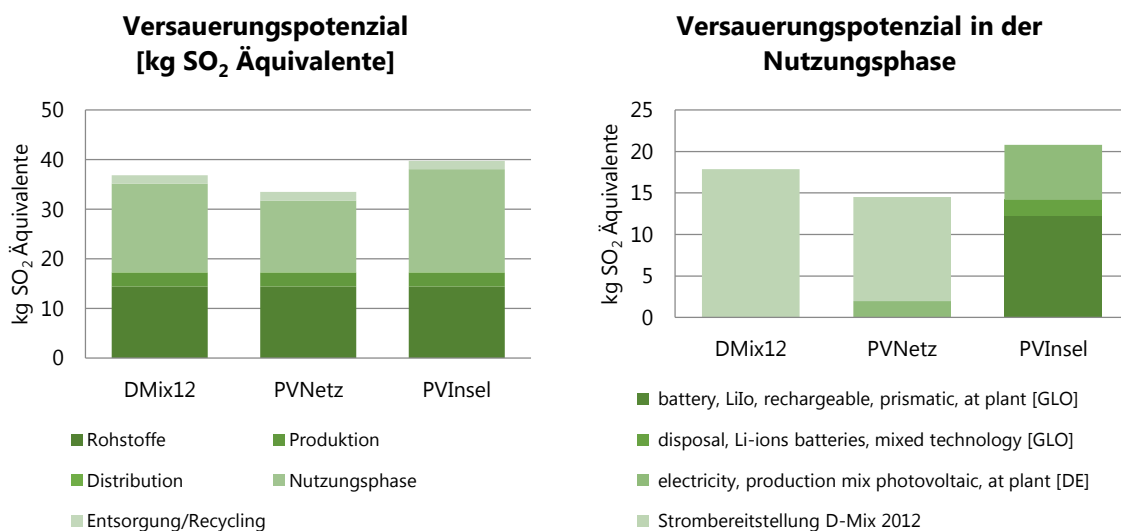


Abbildung 4-20: Ergebnisse der Wirkungsbilanz – Versauerungspotenzial

<sup>19</sup> Bedeutende versauernde Emissionen sind SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und NH<sub>x</sub>. Sie wirken auf Boden, Grund- und Oberflächenwasser, biologische Organismen, Ökosysteme und Bauwerke (Guinée et al. 2002).

### 4.3.2 Rangfolgenvergleich der Ergebnisse

Um die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zusammenzufassen, bevor sie in Kapitel 5 bewertet und interpretiert werden, folgt ein Rangfolgenvergleich der Szenarien um einen ersten übersichtlichen Überblick über die Ergebnisse der elf verschiedenen Einflusskategorien zu erhalten. Ausgehend von einer Gleichberechtigung aller Kategorien würde das Szenario PVInsel demzufolge als bestes Szenario abschneiden gefolgt vom Szenario PVNetz. Das Szenario DMix12 wäre demnach als umweltschädlichstes Szenario einzustufen (Tab. 4-5).

*Tabelle 4-5: Rangfolgenvergleich aller Wirkungskategorien (1 = geringster Einfluss, 3 = höchster Einfluss)*

<b>Wirkungskategorien</b>	<b>DMix12</b>	<b>PVNetz</b>	<b>PVInsel</b>
<b>Erschöpfung abiotischer Ressourcen</b>	3	2	1
<b>Boden Ökotoxizität</b>	3	2	1
<b>Aquatische Seewasser Toxizität</b>	3	2	1
<b>Sedimentäre Seewasser Toxizität</b>	3	2	1
<b>Aquatische Süßwasser Toxizität</b>	3	2	1
<b>Sedimentäre Süßwasser Toxizität</b>	3	2	1
<b>Human Toxizität</b>	2	1	3
<b>Photochemische Oxidation</b>	2	1	3
<b>Stratosphärischer Ozonabbau</b>	1	2	3
<b>Treibhauspotenzial</b>	3	2	1
<b>Überdüngungspotenzial (generisch)</b>	3	2	1
<b>Überdüngungspotenzial (europ.)</b>	3	2	1
<b>Versauerungspotenzial</b>	2	1	3

## 5 Ergebnisse

In diesem Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Ökobilanz ausgewertet, interpretiert und kritisch hinterfragt. Nach DIN EN ISO 14044 folgt in einer Ökobilanz auf die Durchführung der Wirkungsbilanz die Interpretation der Ergebnisse im Rahmen der Zieldefinition und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz-Studie. In dieser Arbeit soll die Interpretation der Ergebnisse zusätzlich auf die Problem- und Aufgabenstellung der gesamten Arbeit ausgedehnt werden. Die Besprechung der Ökobilanz-Ergebnisse erfolgt also zusätzlich im Kontext der Problem- und Aufgabenstellung dieser Arbeit, da eine klare Trennung der Ergebnisse der Ökobilanz und der Ergebnisse der Arbeit nicht möglich ist. Im Anschluss findet eine Diskussion der Ergebnisse statt.

### 5.1 Auswertung und Interpretation der Ökobilanz

Die Auswertung und Interpretation der Ökobilanz soll die ermittelten Ergebnisse der Wirkungsbilanz (Kapitel 4.3) verdichten, in den Kontext des Untersuchungsrahmens einordnen und die Ergebnisse im Spiegel der Annahmen bewerten. Dazu ist es zunächst notwendig, die angewandten Wirkungskategorien der Methode CML 2001 zu gewichten, da nicht alle Wirkungskategorien gleichermaßen Schaden in der Umwelt anrichten und sich in Wirkungsort und Dauer unterscheiden können. So kann beispielsweise die Kategorie photochemische Oxidation (Sommersmog) in Bezug auf die Höhe ihrer Umweltschädlichkeit nicht mit der Kategorie Treibhauspotenzial gleichgesetzt werden, da Sommersmog temporär und lokal auftritt, während der Treibhauseffekt langfristige und globale Konsequenzen hat. Zur Gewichtung der Wirkungskategorien wird eine Rangordnung auf die Wirkungskategorien angewandt (vgl. Tab 5-1), welche das Umweltbundesamt auf Basis der folgenden Regeln erstellt hat (Klöpffer und Grahl 2009):

- Tiefgreifende Wirkungen auf Ökosystemebene sind schwerwiegender als auf Organismusebene.
- Irreversible Wirkungen sind schwerwiegender als reversible.
- Ubiquitär auftretende Wirkungen sind schwerwiegender als lokal auftretende.

*Tabelle 5-1: Rangordnung der Wirkungskategorien nach UBA (4 = höchste Priorität, 1 = niedrigste Priorität)*

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Ökologische Gefährdung</b>
<b>Treibhauseffekt</b>	4
<b>Stratosphärischer Ozonabbau</b>	4
<b>Überdüngungspotenzial</b>	3
<b>Versauerungspotenzial</b>	3
<b>Nutzung abiotischer Ressourcen</b>	2
<b>Photochemische Oxidation</b>	1
<b>Öko- und Humantoxizität</b>	Diskussion im Einzelfall

Wendet man nun diese Rangordnung durch Multiplikation auf die in Kapitel 4.3.2 erstellte Rangfolge der Wirkungskategorien in den einzelnen Szenarien an, ergibt sich ein gewichtetes Ergebnis der Wirkungskategorien (vgl. Tab. 5-2); Öko- und Humantoxizitäten werden separat besprochen. Nach der gewichteten Bewertung der Wirkungskategorien schneidet das Szenario PVNetz numerisch betrachtet genauso gut ab wie das Szenario PVInsel. Das Szenario DMix12 ist weiterhin auf dem letzten Platz. Auf diesem Ergebnis aufbauend folgt eine nach Wirkungskategorien differenzierte Betrachtung der gewichteten Ergebnisse im Kontext des Untersuchungsrahmens der Arbeit.

*Tabelle 5-2: Gewichteter Rangfolgenvergleich der Wirkungskategorien (1=geringster Einfluss, 12=höchster Einfluss)*

		DMix12	PVNetz	PVInsel
Treibhauspotenzial	A	12	8	4
Stratosphärischer Ozonabbau	A	4	8	12
Überdüngungspotenzial (generisch)	B	9	6	3
Überdüngungspotenzial (europ.)	B	9	6	3
Versauerungspotenzial	B	6	3	9
Erschöpfung abiotischer Ressourcen	C	6	4	2
Photochemische Oxidation	D	2	1	3

Der Treibhauseffekt und der stratosphärische Ozonabbau sind nach der Rangordnung der Wirkungskategorien des Umweltbundesamtes aufgrund ihrer globalen und schwerwiegenden Wirkung die wichtigsten Umweltwirkungskategorien. Auch im Kontext der Elektromobilität sind sie von großer Bedeutung. Zum einen trägt die zum Laden benötigte Stromerzeugung einen großen Teil zum Treibhauseffekt und zum stratosphärischen Ozonabbau bei und zum anderen bietet sich hier das größte Umweltentlastungspotenzial im Unterschied zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (vgl. Kapitel 2.5).

Das Treibhauspotenzial im Szenario PVInsel ist 63% geringer als im Szenario DMix12. Dies liegt an der Struktur des deutschen Stromgestehungsmix, welcher zu einem Großteil aus fossilen Ressourcen besteht (vgl. Kapitel 4.2.3.1). Auch im Szenario PVNetz kann durch eine Reduktion von 30% des deutschen Strom-Mix eine fast genauso große Reduktion des Treibhauspotenzials erreicht werden. Die Bereitstellung von Strom aus Photovoltaik-Anlagen hat trotz der Berücksichtigung gemischter Modul-Technologie und der Berücksichtigung der Produktionsstätten, welche vorwiegend in China liegen<sup>20</sup>, nur einen verhältnismäßig geringen Einfluss. Für das Speichersystem gilt ähnliches. Die Produktion und Entsorgung der Batterie verursacht in der Nutzungsphase des Mia nur etwa 13% so viel Treibhausgase wie der deutsche Strom-Mix. Der Ausbau erneuerbarer Energieträger in Form von Photovoltaik-Anlagen-Systemen zur Deckung des Ladebedarfs von Elektromobilen führt also auch hier zu

<sup>20</sup> Gemäß der Dokumentation des Datensatzes in Jungbluth (2007).

einer enormen Reduktion der Treibhausgaspotenziale. Am besten zu bewerten ist hier der Inselbetrieb in Verbindung mit einem Li-Ion-Speicher.

Genau anders herum verhält es sich in der Kategorie stratosphärischer Ozon-Abbau, welche vom UBA als genauso schwerwiegend eingestuft wurde wie der Treibhauseffekt. Die Versorgung mit Strom aus dem deutschen Strom-Mix hat hier den geringsten Einfluss, während die Solar-Alternativen schlechter abschneiden (vgl. 4.3). Die Ursache liegt in der Produktion der Photovoltaik-Anlagen, welche einen höheren Ausstoß CFC-11 Äquivalente verursachen als die Verbrennung fossiler Ressourcen. Das Speichersystem hat ebenfalls einen nicht unwesentlichen Einfluss. In der Kategorie stratosphärischer Ozonabbau hat der deutsche Strom-Mix zur Beladung von Elektromobilen also einen Umweltvorteil gegenüber dem Einsatz von Solarstrom.

Das Überdüngungs- und Versauerungspotenzial wurde mit zweithöchster Priorität vom Umweltbundesamt bewertet und auch hier gehen die Ergebnisse wieder auseinander. Während beim Eutrophierungspotenzial (sowohl generisch als auch im europäischen Mittel) das Szenario PVInsel den geringsten Einfluss hat, ergibt sich beim Versauerungspotenzial der höchste Einfluss.

Die gute Bilanz für das Überdüngungspotenzial lässt sich wieder mit der Verringerung des Anteils fossiler Brennstoffe begründen. So schneiden hier beide Solarstrom-Alternativen deutlich besser ab (vgl. 4.3). Die Bereitstellung eines Speichers hat jedoch einen nicht zu vernachlässigen Einfluss in der Nutzungsphase, welcher über dem der eingesetzten Photovoltaik-Anlagen liegt. Festzuhalten bleibt, dass der Austausch fossiler Brennstoffe durch Photovoltaik-Anlagen ein hohes Entlastungspotenzial in der Kategorie Überdüngung bietet und der Einsatz eines Batteriespeichers genauer betrachtet werden muss.

In der Kategorie Versauerungspotenzial schneidet der kombinierte Einsatz von Solarstrom und einem Speicher am schlechtesten ab. Den größten Einfluss hat die Produktion und Entsorgung der Batterie. Unter Verwendung einer anderen oder weniger umweltschädlichen Batterie könnte es jedoch auch hier zu einer Verringerung der Umweltwirkung kommen, da im Szenario PVNetz der Einsatz von Solarstrom die beste Gesamtbilanz hat. Die Substitution des deutschen Strom-Mix durch Solarstrom kann also eine Verringerung des Versauerungspotenzial bewirken. Jedoch bedarf es hier umweltfreundlicher Speichertechnologien um eine vollständige Bereitstellung des Ladestroms mit Photovoltaik-Anlagen zu bewerkstelligen.

Die Erschöpfung abiotischer Ressourcen ist nach dem Umweltbundesamt die drittwichtigste Kategorie. Hier schneidet das Szenario PVInsel um 77% besser ab als das einflussreichste Szenario DMix12. Das Potenzial von Solarstrom ist auch in dieser Wirkungskategorie sehr

hoch und führt im Szenario PVNetz ebenfalls zu einer verbesserten Gesamtbilanz. Die Produktion der Batterie im Szenario PVInsel hat in etwa einen gleich hohen Einfluss wie der Strom aus Photovoltaik-Anlagen. Das Insel-System bietet den größten Umweltvorteil.

Der photochemischen Oxidation (Sommersmog) wird aufgrund seiner temporären und lokalen Effekte nur die vierthöchste Priorität eingeräumt. Das Ergebnis in dieser Kategorie verhält sich genauso wie für das Versauerungspotenzial: Der Einsatz von Solarstrom anstelle von Strom aus dem deutschen Strom-Mix hat einen geringeren, die Bereitstellung eines Stromspeichers hat aber einen sehr hohen Einfluss. So hat hier das Szenario PVNetz vor den Szenarien DMix12 und PVInsel den geringsten Einfluss.

Die verschiedenen Toxizitätskategorien sollen gemäß dem Umweltbundesamt einzeln besprochen werden da diese Kategorien aus diversen Gründen keiner eindeutigen Gewichtung unterzogen werden können. Es gibt viele hundert Substanzen welche diesen Kategorien zugeordnet werden können und müssen. Diese können in Luft, Boden und Wasser abgegeben werden und dort auf vielfältige Weise wirken. Die Charakterisierungsfaktoren sollen die diversen Auswirkungen in 1,4-Dichlorbenzen Äquivalenten [kg] zu erfassen um ein Maß für die Gesamttoxizität eines Prozesses darstellen zu können. Die zur Bewertung der Toxizitätskategorien eingesetzten Charakterisierungsfaktoren sind nach Guinée et. al (2002) jedoch weit entfernt von einem wissenschaftlichen Konsens. In einigen Ökobilanz-Studien wird daher komplett auf die Betrachtung der Toxizitätskategorien verzichtet. Klöpfer & Grahl (2007) empfehlen zur Bewertung der Toxizitätskategorien eine Modellierung mit Informationen zu möglichst vielen einzelnen Chemikalien die nicht aus generischen Datensätzen zu Energie- und Transportprozessen stammen, sondern durch sorgfältige spezifische Prozessanalysen ermittelt wurden. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch ausschließlich mit generischen Datensätzen gearbeitet wurde, sind die Ergebnisse in Bezug auf die Toxizitäten nur bedingt aussagekräftig. Aufgrund der Tatsache, dass für alle bewerteten Prozesssysteme die gleiche Datenbasis verwendet wurde, können die Ergebnisse der Toxizitätskategorien aber als Trend gewertet werden.

Abgesehen von der Humantoxizität trägt das Szenario PVInsel den geringsten Beitrag an den Toxizitätskategorien, gefolgt vom Szenario PVNetz und dann DMix12. In der Kategorie Humantoxizität verursacht die Produktion der Batterie einen sehr hohen Einfluss und führt dazu, dass die PVInsel-Variante den höchsten Einfluss hat. Auch hier Bedarf es also einer tieferen Analyse des Produktionsprozesses der Batterie.

In den Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Verbrauch abiotischer Ressourcen verursacht das Szenario PVInsel insgesamt die geringsten Umwelteinflüsse. Würde die zur Produktion der Batterie und der Solarmodule eingesetzte

Energie ebenfalls aus regenerativen Quellen stammen, so würde sich das Umweltpotenzial dieser Variante noch vergrößern. Hier besteht vor allem für die Wirkungskategorien stratosphärischer Ozonabbau, Versauerungspotenzial und photochemische Oxidation Handlungsbedarf. Die Produktion der Batterie verursacht in diesen Kategorien einen großen Einfluss und sollte in diesen Kategorien einer tieferen Analyse unterzogen werden.

Das Szenario PVNetz kommt in der numerischen Gewichtung zwar auf den gleichen Einfluss wie das Szenario PVInsel, kann aber aufgrund seines immer noch hohen Anteils an Energie aus fossilen Brennstoffen nur als Übergangslösung betrachtet werden. Im Gegensatz zum Szenario DMix12 bietet die vorrangige Nutzung von Solarstrom Einsparpotenziale in fast allen Kategorien. Die Produktion der PV-Anlagen führt nur in der Wirkungskategorie stratosphärischer Ozonabbau zu einem höheren Einfluss. Hier besteht Bedarf einer tieferen Analyse der Bereitstellung von Solarmodulen um diesen Einfluss zu mindern. Insgesamt kann das Szenario PVNetz aber als eine kurzfristige Lösung zum Erreichen geringerer Umweltwirkungen angesehen werden.

Als abschließende Erkenntnis der vergleichenden Ökobilanz unter Berücksichtigung der Gewichtung nach dem Umweltbundesamt kann von einer Verbesserung der Umweltwirkungen durch den Einsatz von Solarstrom anstelle von Strom aus einem von fossilen Energieträgern dominierten Strom-Mix ausgegangen werden. Je mehr Solarstrom Einzug in die Nutzungsphase finden kann, desto höher werden die Umweltentlastungspotenziale für Elektromobile. Für eine schnelle Integration von Solarstrom in die Nutzungsphase von Elektromobilen bietet sich zunächst die Ermittlung des maximal nutzbaren Anteils von Solarstrom auf Basis des individuellen Nutzungsprofils einer zu betrachtenden Fahrzeugflotte an. Wird dieser Bedarf über vorhandene Photovoltaik-Anlagen oder über einen Solarstrom-Tarif gedeckt können kurzfristig Umweltwirkungen reduziert werden. Das Potenzial für Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit einem Li-Ion-Batteriespeicher ist zum jetzigen Stand der Technik in Bezug auf die Umweltwirkungen nicht die bestmögliche Systemlösung. Langfristig liegen hier, in Kombination mit verbesserten Prozessen zur Herstellung von Li-Ion-Speichersystemen und Photovoltaik-Anlagen die größten Einsparpotenziale.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Entscheidend für die Aussagefähigkeit der Ergebnisse sind die getroffenen Annahmen und Berechnungen zum Untersuchungsobjekt der Ökobilanz und in der Durchführung der Ökobilanz. Die entscheidenden Annahmen werden im Folgenden auf ihre Relevanz für die Aussagekraft des Ergebnisses untersucht.

Die Ergebnisse der Ökobilanz sind nur vergleichbar mit einer Elektromobilflotte mit dem IWF ähnlichen Nutzungsprofilen und gleicher technischer Daten und Werte für Verbrauch und Ladezeiten. Insbesondere die getroffenen Annahmen und Berechnungen des Verbrauchs (vgl. 3.1) und die grobe Einteilung in Sommer- und Wintermonate (vgl. 3.3) beeinflussen das Ergebnis entscheidend. Ein erhöhter Verbrauch würde zu geringeren Reichweiten und damit zu einer noch geringeren Nutzungsintensität der Fahrzeuge führen. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer solaren Lösung würde hier wahrscheinlich alle ökologischen Vorteile verdrängen. Ein verringerter Verbrauch hingegen, würde zu höheren Reichweiten und damit zu einem höheren Verbrauch im Lebensweg der 150.000 km des Mia führen. Das Speichersystem müsste größer bemessen werden und die Annahmen zu den Ladezyklen, der Lebensdauer eines Li-Ion-Speichersystems (vgl. 4.2.3.3), müssten eingehend geprüft werden. Aufgrund der erhöhten Ladezyklen könnte die Lebensdauer des Li-Ion-Speichers vor der Lebensdauer der Flotte enden und ein zweiter Speicher bzw. ein effizienterer Speicher mit einer höheren Lebensdauer wäre notwendig.

Ebenso entscheidend sind die Annahmen zum Ladeverhalten des Fahrzeugs. Es wird im netzgekoppelten Betrieb (Szenario PVNetz) kein Lademanagement betrieben; das Fahrzeug lädt direkt nach jeder Fahrt (vgl. 3.3). Die Implementierung eines Lademanagements könnte hier schnell eine Steigerung des Anteils genutzten Solarstroms bewirken und gehört daher genauer untersucht.

Die Ermittlung des Anteils von genutztem Solarstrom (vgl. 4.2.3.2) wurde zwar auf Basis der Nutzungsprofile der Fahrzeugflotte erstellt, erfuhr daraufhin aber eine Relativierung hin zu einem Jahresdurchschnitt. Wünschenswert wäre hier eine umfassendere Modellierung mit der Berücksichtigung von Messdaten realer Photovoltaik-Anlagen und deren täglicher solarer Stromerzeugung im Tagesverlauf für ein Jahr und möglichst am Standort des IWF. Die Bewertung einer vor Ort installierten Anlage anstatt eines Solar-Strom-Tarifs in Verbindung mit zusätzlichen Verbrauchern könnte für die Nutzungsphase eine bilanzielle Verbesserung bieten.

Desweiteren wurde eine geeignete Ladesäule nur am IWF angenommen. Mit der Verbreitung geeigneter Ladeinfrastruktur könnte die Reichweite des Mia signifikant erhöht werden. Auch würde es dann Sinn machen, die Ladeinfrastruktur an sich mit in die ökologische Bewertung einzubeziehen. Im Falle einer 400-Volt Ladeinfrastruktur könnte sogar der Citroen C-Zero mit seiner sehr viel kürzeren Ladezeit (vgl. 3.1) zu einer besseren, flexibleren, Lösung für eine Elektromobilflotte am IWF werden.

Eine weitere Einschränkung muss in Bezug auf die eingesetzten generischen Datensätze der Datenbank *ecoinvent* 2.2 getroffen werden. Die generischen Datensätze für die Hintergrund-



Prozesse der Modellierung stellen das gesamte Umweltinventar und sind nur im Rahmen ihrer allgemeinen Annahmen gültig. Hier wäre die Verwendung von Primärdaten zwar wünschenswert, doch praktisch kaum umsetzbar. Der Fokus bei einer Primärdatenerhebung sollte jedoch auf der detaillierten Beschreibung der Prozesssysteme für PVA und Stromspeicher liegen, da in der Nutzungsphase der Elektromobile dort die größten Einsparpotenziale liegen (vgl. 4.3.1).

In der Nutzungsphase liegt auch für den deutschen Stromgestehungsmix trotz der negativen Ergebnisse ein nicht zu vernachlässigendes Potenzial für zukünftige Ökobilanzen (Szenario DMix12). Dieser sollte bei Ökobilanzen immer auf Basis der aktuellsten Zahlen zu Erzeugung und Import modelliert werden, da durch die beschlossene Energiewende (vgl. 2.1) zukünftig eine Verringerung der Umweltwirkungen durch den Strom-Mix zu verbuchen sein sollte.

Unter Berücksichtigung des verwendeten Datensatzes für die Produktion der Photovoltaik-Anlagen (vgl. 4.2.3.2), welcher einen Technologie- und Materialmix der in Deutschland eingesetzten Module beschreibt, besteht unter Umständen noch Verbesserungspotenzial z.B. in der Wirkungskategorie stratosphärischer Ozonabbau. Die Wahl der Zelltechnologie kann hier einen entscheidenden Einfluss haben (vgl. 2.3) und sollte daher genauer untersucht und modelliert werden.

Der letzte zu erwähnende Punkt in der Diskussion der Ergebnisse betrifft die Modellierung des Batteriespeichers im Szenario PVInsel. Diese basiert auf der Annahme, dass der modellierte Li-Ion-Speicher tatsächlich genügend Ladezyklen für den gesamten Stromverbrauch eines Fahrzeugs bereitstellen kann. Hier sind die getroffenen Annahmen zu Entladetiefe, Energiedichte und maximalen Ladezyklen des Speichers ausschlaggebend (vgl. 4.2.3.3). Aufgrund der geringen Nutzungsintensität der Flotte ist der Einsatz eines PVA-Inselsystems wirtschaftlich betrachtet äußerst fragwürdig und würde sich sehr spät bis gar nicht amortisieren. Sinnvoller wäre hier die Betrachtung einer netzgekoppelten PVA mit einem kleineren Speicher zur Maximierung des Eigenverbrauches einer geeigneten Solar-Anlage. Diese System-Variante sollte bei der Planung des Einsatzes der Elektromobilflotte am IWF berücksichtigt werden.

## 6 Fazit & Ausblick

### 6.1 Fazit

Der Einsatz von Solarstrom anstelle von Strom aus fossiler Bereitstellung ist in der Nutzungsphase von Elektromobilen mit hohen Umweltentlastungspotenzialen verbunden. Diese Kernaussage konnte durch die ökologische Bewertung verschiedener Strombereitstellungsszenarien mit einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044 ermittelt werden.

Der deutsche Stromgestehungsmix verursacht auf Grund seines hohen Anteils an fossilen Brennstoffen vielfältige Umweltwirkungen. Wird der deutsche Stromgestehungsmix durch Solarstrom aus Photovoltaik-Anlagen-Systemen bereitgestellt lassen sich die Umwelteinflüsse meistens um ein vielfaches reduzieren (z.B. Treibhausgasemissionen). Kurzfristig lassen sich durch netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen mit einem maximalen Eigenverbrauchsanteil große Reduzierungen der Umwelteinflüsse erwirken. Hier gilt: Je mehr Strom aus dem von fossilen Energieträgern geprägtem Strom-Mix durch Solarstrom ersetzt wird, desto geringer die Umwelteinflüsse. Bei einer langfristigen Betrachtung sind Photovoltaik-Anlagen-Systeme mit einem Li-Ion-Stromspeicher die bessere Option. Durch sie, steht der Solarstrom unabhängig vom Strahlungsangebot der Sonne zur Verfügung und eine vollständige Beladung der Fahrzeugbatterie durch umweltschonenden Solarstrom kann erfolgen. Zu beachten ist der Umwelteinfluss des Li-Ion-Speichers, welcher zum jetzigen Stand der Technik als verbesserungswürdig zu bewerten ist. Es bedarf effizienterer und umweltschonenderer Speicher-Technologien um das volle Potenzial solcher PVA-Systeme ausschöpfen zu können.

Diese Ergebnisse beruhen auf den in der Arbeit getroffenen Annahmen und basieren auf dem Nutzungsprofil der konventionellen Fahrzeugflotte des IWF. Daher können Vergleiche zu anderen Flotten nur unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen angestellt werden.

Zukünftig muss die Einführung von Photovoltaik-Systemen unbedingt darauf ausgerichtet sein, den vorhandenen Solarstrom unabhängig von der Nachfrage bereitstellen zu können. Sei es durch die Steigerung des Eigenverbrauchs mit Lademanagement(systemen) oder durch den Einsatz effizienterer Speichertechnologien. In Kombination mit anderen Quellen regenerativer Energie, wie z.B. Windkraft, könnte eine Entkopplung vom solaren Strahlungsangebot erfolgen und damit eine weitere Optimierung der Umwelteinflüsse erreicht werden. Das Umweltentlastungspotenzial von Elektrofahrzeugen könnte durch ein Zusammenspiel regenerativer Energieträger erhöht werden.

Der politisch beschlossene Ausbau von regenerativen Energiesystemen mit der gleichzeitigen Einführung von Elektromobilen birgt enorme Umweltentlastungspotenziale und stellt eine Chance für eine postfossile und zukunftsfähige Mobilität in Deutschland dar.

## 6.2 Ausblick

Im Gegensatz zu fossil angetriebenen Fahrzeugen können beim heutigen Stand der Technik Elektromobile in betrieblichen Fahrzeugflotten wie der des IWF aufgrund geringer Reichweiten, langer Ladezeiten und unzureichender Ladeinfrastruktur, nur als Kurzstreckenfahrzeuge genutzt werden. Dies schränkt auch die notwendige Nutzerakzeptanz ein, welche für eine zügige Einführung von Elektromobilen in Deutschland unabdingbar ist (BReg 2009a). Das Ziel der deutschen BReg schon im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen eingeführt zu haben scheint momentan so nicht erreichbar, doch wird es langfristig zu einer Energiewende im Verkehr kommen (Zimmer et. al 2011).

Das Problem der geringen Reichweite begründet sich zum einen in der Batterietechnik und zum anderen in fehlender Infrastruktur zum Beladen der Fahrzeuge. Die Errichtung einer geeigneten Infrastruktur wird derzeit in diversen Public-Private-Partnerships getestet und soll daraufhin stattfinden (BReg 2009a). Die Batterietechnik ist ebenfalls im Fokus von bundesweiten Förderungsprogrammen. An mehreren Institutionen wird an der fortschreitenden Entwicklung leistungstärkerer Batterien und verbesserten Recyclingmöglichkeiten gearbeitet. Die Forschung und Entwicklung von Batteriesystemen verzeichnet jährlich Erfolge in Form von höheren Energiedichten und höherer Lebensdauer und unterstützt langfristig die Einführung der postfossilen Mobilität (Thielmann et. al 2013).

Betrachtet man die Umweltwirkungen von Elektroautos in der Nutzung sind diese zumindest lokal emissionsfrei und haben unter Verwendung regenerativen Stroms im Gegensatz zum Diesel- oder Benzinfahrzeug einen fast dreimal höheren Wirkungsgrad. Vergleichende Ökobilanzen zeigen, dass bereits bei Nutzung des deutschen Strom-Mix Elektromobile in vielen Kategorien umweltfreundlicher sind als die fossil angetriebene Konkurrenz (Kurmann 2013). Im Hinblick auf den politisch beschlossenen Wandel zu einem deutschen Stromgestehungsmix auf Basis regenerativer Energien bis 2050 (BMU 2010), kann hier eine kontinuierliche Reduzierung der Umweltwirkungen prognostiziert werden.

Mit einher, gehen Fortschritte in der Entwicklung von effizienteren und umweltfreundlicheren Photovoltaik-Anlagen-Systemen. Solarzellen aus organischen Materialien verzichten beispielsweise vollständig auf den Einsatz von gefährlichen Stoffen<sup>21</sup> und lassen sich leichter und effizienter recyceln. Zudem erreichen sie beim Stand der Technik fast die gleichen Wirkungsgrade wie Solarzellen auf Basis von Silizium und lassen sich einfacher in Masse anfertigen. Ende 2013 sollen die ersten Anwendungen mit organischen Solarmodulen auf den Markt kommen (Heliatek 2013).

---

<sup>21</sup> Mit gefährlichen Stoffen sind hier Stoffe nach der EG-Richtlinie 2005/95EG (RoHS) zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten gemeint.

In diesem Zusammenhang spielt in Zukunft auch die Erhöhung des Eigenverbrauchs von Photovoltaik-Anlagen-Systemen eine große Rolle. In Kombination mit einem Batteriespeicher und einem geeigneten Lademanagementsystem kann erzeugter Solarstrom für Elektromobile und andere Verbraucher optimal eingesetzt werden und zudem das Strom-Netz entlasten. Hier ist das vom BMU geförderte Konzept „Sol-Ion“ zu erwähnen. Es dient der Optimierung des Eigenverbrauches mit einem PV-Speicher unter Verwendung von Lithium-Ionen-Technologie als Speichermedium und steht beispielhaft für laufende Forschungsprojekte aus Wissenschaft und Wirtschaft (Schmiegel et al. 2011). Das „Sol-Ion“-System<sup>22</sup> lässt sich leicht in bestehende Systeme integrieren und soll in den nächsten Jahren Marktreife erlangen. Auch Elektrofahrzeuge wirken bei der Einführung eines regenerativen Energiesystems unterstützend, indem sie zum Beispiel als Nachtspeicher Lastschwankungen des Strom-Netzes ausgleichen (FGG 2012).

Durch die Kombination einer verbesserten Ladeinfrastruktur, der vermehrten regenerativen Energienutzung durch Lademanagement sowie der vermehrten Forschung in den Bereichen Batterietechnik und Photovoltaik, kann in Zukunft bei der Nutzung von Elektrofahrzeugen eine erhebliche Verbesserung der Ökobilanz von Elektromobilen erreicht werden.

---

<sup>22</sup> Projekt-Homepage: <http://www.sol-ion-project.eu/sites/en/>

## Literaturverzeichnis

- Adensam et. al 2000** - Adensam, Heidi; Ganglberger, Erika; Gupfinger, Henriette; Wenisch, Antonia (2000): Studie zur Nutzbarkeit von Ökobilanzen für Prozess- und Produktvergleiche. Analyse von Methoden, Problemen und Forschungsbedarf. Hg. v. Österreichisches Ökologie Institut. Wien. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/daten/produkte/gemis/oekobil.pdf>, zuletzt aktualisiert 2000, zuletzt geprüft am 01.06.2013.
- AGEB 2013** - AG Energiebilanzen e.V. (2013): Tabelle zur Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2012. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Online verfügbar unter [http://www.ag-energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1357206124.pdf&filename=BRD\\_Stromerzeugung1990-2012&mimetype=application/pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1357206124.pdf&filename=BRD_Stromerzeugung1990-2012&mimetype=application/pdf), zuletzt aktualisiert am 14.02.2013, zuletzt geprüft am 02.06.2013.
- Althaus et. al 2010** - Althaus, Hans-Joerg; Gauch, Marcel (2010): Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität. Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Hg. v. EMPA Materials Science & Technology. Dübendorf. Online verfügbar unter [http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/104369/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/104369/---/l=1), zuletzt aktualisiert am 20.10.2010, zuletzt geprüft am 31.05.2013.
- Baumann und Tillmann 2004** - Baumann, Henrikke; Tillman, Anne-Marie (2004): The hitch hiker's guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. Lund, Sweden: Studentlitteratur.
- BEE 2013** - Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (2013): Elektromobilität und Erneuerbare Energien. BEE-Position. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Online verfügbar unter [http://www.bee-ev.de/\\_downloads/publikationen/sonstiges/2010/1005\\_BEE-Position\\_Erneuerbare-Elektromobilitaet.pdf](http://www.bee-ev.de/_downloads/publikationen/sonstiges/2010/1005_BEE-Position_Erneuerbare-Elektromobilitaet.pdf), zuletzt aktualisiert am 28.05.2010, zuletzt geprüft am 11.06.2013.
- Bloch 2011** - Bloch, A. (2011): Elektroauto-Reichweite im Winter. Bis zu 47 Prozent geringere -Reichweite. In: *Auto Motor Sport* 2011 (01), S. 15 ff.
- Bost et. al 2011** - Bost, Mark; Hirschl, Bernd; Aretz, Astrid (2011): Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der Photovoltaik. Beginn der dezentralen Energierevolution oder Nischeneffekt? Hg. v. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Greenpeace Energy eG. Berlin, Hamburg
- Braun und Landau 2011** - Braun, M.; Landau, M. (2011): Sol-ion. Erneuerbare Energie Systeme mit Lithium-Ionen-Energiespeichersystemen für die Anwendung im häuslichen Bereich und für kleine Gewerbebetriebe. Hg. v. Fraunhofer IWES. Fraunhofer IWES. Online verfügbar unter <http://www.iwes.fraunhofer.de/de/projekte/suche/2011/sol-ion.html>, zuletzt geprüft am 05.06.2013.
- Buchert et. al 2011** - Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Merz, Cornelia; Schüler, Doris (2011): Ökobilanz zum "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien" (LithoRec). Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf>, zuletzt geprüft am 07.06.2013.

**BMWi 2012** - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2012): Die Energiewende in Deutschland. Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Paderborn. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/energiewende-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt aktualisiert am 26.11.2012, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**BMWi 2013** - Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2013): Erster Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft". Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Paderborn. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/erster-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2013, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**BReg 2009a** - Bundesregierung Deutschland (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Hg. v. Die Bundesregierung. Die Bundesregierung. Online verfügbar unter [http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler\\_entwicklungsplan\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf), zuletzt aktualisiert 2009.

**BReg 2009b** - Bundesregierung Deutschland (26.03.2009): Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, zuletzt geprüft am 12.06.2013.

**BMU 2004** - Bundesumweltministerium (BMU) (21.07.2004): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG). EEG.

**BMU 2010** - Bundesumweltministerium (BMU) (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energien. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3997.pdf>, zuletzt aktualisiert 2010, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**BMU 2012** - Bundesumweltministerium (BMU) (2012): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung. Hg. v. Bundesumweltministerium (BMU). Bundesumweltministerium (BMU). Paderborn. Online verfügbar unter [https://secure.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere\\_ee\\_zahlen\\_bf.pdf](https://secure.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf), zuletzt aktualisiert am 20.09.2012, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**BSM 2013** - Bundesverband Solare Mobilität e.V. (BSM): Sonne bewegt. Die Zukunft bewegen - Solare Mobilität. Online verfügbar unter <http://www.bsm-ev.de/presse/bsm-flyer>, zuletzt geprüft am 01.06.2013.

**DEKRA 2012** - DEKRA Automobil GmbH (2012): Elektromobilität. Informationen und Fakten. Hg. v. DEKRA Automobil GmbH. Online verfügbar unter <http://www.dekra.de/de/elektromobilitaet>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2012, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Del Duce et. al 2013** - Del Duce, Andrea; Egede, Patricia; Öhlschläger, Gerlind; Dettmer, Tina; Althaus, Hans-Jörg; Büttler, Thomas; Szczechowicz, Eva (2013): eLCAr - Guidelines for the LCA of electric vehicles. Guidebook for LCA studies in the context of e-mobility. Online verfügbar unter <http://www.elcar-project.eu/downloads/guidelines/>, zuletzt aktualisiert am 12.03.2013, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**DIN EN ISO 14044:2006-10:** Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Online verfügbar unter <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14044/88762013>, zuletzt geprüft am 17.03.2013.

**European Union 2013** - European Union (2013): The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. Online verfügbar unter <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 02.06.2013.

**FGG 2012** - Fleets Go Green Projektpartner (2012): Fleets Go Green. Ganzheitliche Analyse und Bewertung der Umwelteffizienz von Elektro- und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen in der Alltagsnutzung am Beispiel des Flottenbetriebs. Hg. v. Fleets Go Green Projektpartner. Braunschweig

**Frischknecht 2009** - Frischknecht, Rolf (2009): Umweltverträgliche Technologien: Analyse und Beurteilung. Teil 2: Ökobilanzen (Life Cycle Assessment, LCA). Skript, Frühjahrssemester 2009. Zürich.

**Frischknecht und Flury 2011** - Frischknecht, Rolf; Flury, Karin (2011): Life cycle assessment of electric mobility: answers and challenges. In: *Internation Journal of Life Cycle Assessment* 16 (7), S. 691–695.

**Frischknecht et. al 2007** - Frischknecht, Rolf; Tuchschnid, M.; Faist Emmenegger, M.; Bauer, C.; Dones, R. (2007): Strommix und Stromnetz. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (ed. Dones R.). Ecoinvent Report No. 6, v2.0. Hg. v. Swiss Centre for Life Cycle Inventories Paul Scherer Institut Villigen. Dübendorf

**Frischknecht et. al 2012** - Frischknecht, Rolf; Stucki, Matthias; Flury, Karin; Itten, René; Tuchschnid, Matthias (2012): Primärenergiefaktoren von Energiesystemen. Online verfügbar unter [http://treeze.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/Publications/Case\\_Studies/Energy/frischknecht-2012-PEF-Energiesysteme-v2.2.pdf](http://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/frischknecht-2012-PEF-Energiesysteme-v2.2.pdf), zuletzt aktualisiert am 23.07.2012, zuletzt geprüft am 12.06.2013.

**Grude 1988** - Grude, Ulrich (1988): Petri-Netze - eine informelle Einführung in die Grundideen. Hg. v. Beuth Hochschule Berlin. Bonn/Berlin. Online verfügbar unter <http://public.tfh-berlin.de/~grude/Petrinetze.pdf>, zuletzt aktualisiert 1988, zuletzt geprüft am 21.03.2013.

**Guinée et. al 2002** - Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de et al. (2002): Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Berlin: Springer.

**GWL Power 2011** - GWL Power (2011): High Current Charging and Discharging Report for Lithium (LiFeYPO<sub>4</sub>) Cells. Online verfügbar unter [http://www.auto88.cz/\\_info/Tests/GWL-Power-Performance-Test.pdf](http://www.auto88.cz/_info/Tests/GWL-Power-Performance-Test.pdf), zuletzt aktualisiert am 13.05.2011, zuletzt geprüft am 03.06.2013.

**Heliatek 2013** - Heliatek GmbH (16.01.2013): Neuer Weltrekord für organische Solarzellen: Heliatek behauptet sich mit 12% Zelleffizienz als Technologieführer. Online verfügbar unter [http://www.heliatek.com/wp-content/uploads/2013/01/130116\\_PM\\_Heliatek-erzielt-Weltrekord-effizienz-fuer-OPV.pdf](http://www.heliatek.com/wp-content/uploads/2013/01/130116_PM_Heliatek-erzielt-Weltrekord-effizienz-fuer-OPV.pdf), zuletzt geprüft am 10.06.2013.



**Helms et. al 2011** - Helms, Hinrich; Jöhrens, Julia; Hanusch, Jan; Höpfner, Ulrich; Lambrecht, Udo; Pehnt, Martin (2011): UMBReLA - Umweltbilanzen Elektromobilität. Wissenschaftlicher Grundlagenbericht. gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Unter Mitarbeit von Lilith Henes, Benjamin Gugel und Alexander Schacht. Hg. v. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. Heidelberg. Online verfügbar unter <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/begleitforschung/dokumente-downloads/ErgebnisberichtUMBReLAIFEUfinal.pdf>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2011, zuletzt geprüft am 18.02.2013.

**Hischier et. al 2007** - Hischier, R.; Classen, M.; Lehmann, M.; Scharnhorst, W. (2007): Life cycle inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal. ecoinvent report No. 18. Hg. v. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. EMPA Materials Science & Technology. Dübendorf.

**Huber 2010** - Huber, Stefan (05.07.2012): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen. Umweltsystemanalyse & Mensch-Umwelt Interaktionen. Humboldt Universität zu Berlin. Berlin, 05.07.2012.

**ILCD 2010** - European Commission (2010): ILCD handbook. General guide for life cycle assessment : detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union (Scientific and technical research series, 24708).

**IPCC 2007** - IPCC (2007): Klimaänderung 2007 - Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4) ; I. Wissenschaftliche Grundlagen, II. Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten, III. Verminderung des Klimawandels. Unter Mitarbeit von Carola Best. Intergovernmental Panel on Climate Change. Bern. Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/deutch/IPCC2007-WG1.pdf>, zuletzt aktualisiert 2007, zuletzt geprüft am 01.06.2013.

**Jungbluth 2007** - Jungbluth, Niels (2007): Sonnenkollektor-Anlagen. In Dones, R. (Ed.) et. al, Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen von Ökobilanzen für die Schweiz. ecoinvent report No. 6-XI. Hg. v. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf

**Junghans 2005** - Junghans, Ines (2005): Ökobilanzen erneuerbarer Energiesysteme. Hg. v. TU Freiburg. Freiburg. Online verfügbar unter [http://www.goek.tu-freiburg.de/oberseminar/OS\\_04\\_05/Ines\\_Junghans.pdf](http://www.goek.tu-freiburg.de/oberseminar/OS_04_05/Ines_Junghans.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Kaltschmitt et. al 2003** - Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (2003): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin: Springer.

**Kasten und Zimmer 2011** - Kasten, Peter; Zimmer, Wiebke (2011): CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts "Future Fleet". Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1343/2011-027-de.pdf>, zuletzt aktualisiert am 17.10.2011, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Klöpffer und Gral 2009** - Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH.



**Konopka 2012** - Konopka, Anja (2012): Duden, Deutsches Wörterbuch. Auf der Grundlage der amtlichen Rechtschreibregeln. Ungekürzte Lizenzausg. Rheda-Wiedenbrück, Gütersloh: RM-Buch-und-Medien-Vertrieb.

**KFA 2011** - Kraftfahrtbundesamt (2011): Fachartikel: Halter der Fahrzeuge. Statistik. Hg. v. Kraftfahrtbundesamt (KFA). Online verfügbar unter [http://www.kba.de/nn\\_1247222/SharedDocs/Publikationen/FZ/Fachartikel/halter\\_20111015,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/halter\\_20111015.pdf](http://www.kba.de/nn_1247222/SharedDocs/Publikationen/FZ/Fachartikel/halter_20111015,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/halter_20111015.pdf), zuletzt aktualisiert am 15.10.2011, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**KFA 2013** - Kraftfahrtbundesamt (KFA) (2013): Pressemitteilung Nr. 8/2013. Der Fahrzeugbestand am 01. Januar 2013. Unter Mitarbeit von Pressestelle. Kraftfahrtbundesamt (KFA), zuletzt aktualisiert am 15.02.2013, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Kurmann 2013** - Kurmann, Kevin (2013): Ökologische Bewertung der Fahrzeugflotte des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Bachelorarbeit. Hg. v. Technische Universität Braunschweig. Braunschweig.

**Mertens 2013** - Mertens, Konrad (2013): Photovoltaik. Lehrbuch zur Grundlagen, Technologie und Praxis. München: Carl Hanser Verlag.

**mia electric 2012** - mia electric (2012): mia electric. Preisliste / Optionen / Technische Daten. Hg. v. mia electric. Online verfügbar unter [http://www.lautlos-durch-deutschland.de/fileadmin/Produkte/mia/Dokumente/Mia\\_price\\_Mai\\_2012\\_de.pdf](http://www.lautlos-durch-deutschland.de/fileadmin/Produkte/mia/Dokumente/Mia_price_Mai_2012_de.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Held 2010** – Held, Michael (2010): Photovoltaik aus Sicht der Ökobilanz. Clusterforum "Recycling in der Photovoltaik". Fraunhofer IBP. München, 01.12.2010.

**Nickel 2012** - Nickel, Michael (2012): Entwicklungen in der deutschen Stromwirtschaft 2012. Hg. v. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Online verfügbar unter <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CFQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ag-energiebilanzen.de%2Fcomponenten%2Fdownload.php%3Ffiledata%3D1355908229.pdf%26filename%3DStromKJ2012.pdf%26mimetype%3Dapplication%2Fpdf&ei=VGqrUZ32F8eotAb1qoGIBQ&usq=AFQjCNErF1FzXysV8jeGG9CIQcheftXdVA&sig2=tidRXyD7cp9CRz4omoTeYQ&bvm=bv.47244034,d.Yms>, zuletzt aktualisiert am 18.12.2012, zuletzt geprüft am 02.06.2013.

**Quaschnig 2007** - Quaschnig, Volker (2007): Regenerative Energiesysteme. Technologie, Berechnung, Simulation. 5. Aufl. München: Hanser.

**Retzbach 2008** - Retzbach, Ludwig (2008): Akkus und Ladetechniken. Poing: Franzis-Verl. (Franzis Elektronik).

**Schmidt et. al 2009** - Schmidt, Mario; Lambrecht, Hendrik; Möller, Andreas (Hg.) (2009): Stoffstrombasierte Optimierung. Wissenschaftliche und methodische Grundlagen sowie softwaretechnische Umsetzung. Münster: Monsenstein und Vannerdat.

**Schmidt und Schorb 1995** - Schmidt, Mario; Schorb, Achim (op. 1995): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin [etc.]: Springer.

**Schmiegel et. al 2011** - Schmiegel, Armin; Knaup, Peter; Meißner, Andre; Braun, Martin; Landau, Markus (2011): Leistungsfähigkeit und Verhalten von PV-Speichersystemen. Erfahrungen mit Sol-ion Systemen. Hg. v. voltwerk electronics GmbH. Hamburg. Online verfügbar unter [http://www.sol-ion-project.eu/export/sites/default/en/\\_data/publications/mediatheque-files/Conf\\_Photovoltaische2011.pdf](http://www.sol-ion-project.eu/export/sites/default/en/_data/publications/mediatheque-files/Conf_Photovoltaische2011.pdf), zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 01.06.2013.

**Schuster und Leitinger 2011** - Schuster, A.; Leitinger, C. (2011): Fahrzeug- und Lademonitoring der ersten Generation von Elektromobilen in der Modellregion Vorarlberg. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* (28), S. 2–9.

**SMA 2013** - SMA Solar Technology AG (2013): Eigenverbrauchsoptimierung mit SMA Flexible Storage System. Hg. v. SMA Solar Technology AG. Online verfügbar unter <http://files.sma.de/dl/1353/SI-HoMan-PL-de-14.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2013, zuletzt geprüft am 03.06.2013.

**Spielmann et. al 2007** - Spielmann, M.; Bauer, C.; Dones, R.; Tuchschnid, M. (2007): Transport Services, ecoinvent report No. 14. Hg. v. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf

**Destatis 2013** - Statistisches Bundesamt (2013): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 2012. 1. Aufl. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

**Sträßer 1999** - Sträßer, Manfred (1999): Klimadiagramm-Atlas der Erde. Dortmund: Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur (Duisburger geographische Arbeiten, 20).

**Ecoinvent 2010** - Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2010): ECOINVENT 2.2. Schweiz.

**Thielmann et. al 2013** - Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin; Plötz, Patrick (2012): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Schriftenreihe des Fraunhofer ISI. Hg. v. Fraunhofer ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/v/de/publikationen/PRM-LIB2030.pdf>, zuletzt aktualisiert am Februar 2012, zuletzt geprüft am 01.06.2013.

**UBA 2011** - Umweltbundesamt (2011): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2011. Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2009. Hg. v. Umweltbundesamt, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

**Watter 2009** - Watter, Holger (2009): Nachhaltige Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis ; mit 45 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

**Winter et. al 2009** - Winter, E.; Mosena, R.; Roberts, L. (2009): Gabler Wirtschaftslexikon. Die ganze Welter der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Wirtschaftsrecht, Recht und Steuern. Wiesbaden: Springer Gabler.

**Wohlgemuth 2012** - Wohlgemuth, Volker (Hg.) (2012): Einsatz der Software UMBERTO in angewandter Forschung und Praxis. Anwendungsfälle und Praxisbeispiele des UMBERTO Competence Centers Berlin (UCC Berlin). 1. Aufl. Herzogenrath: Shaker (Berichte aus der Umweltinformatik).

**Zimmer et. al 2011** - Zimmer, Wiebke; Buchert, Matthias; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian; Harthan, Ralph; Hermann, Hauke et al. (2011): OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Schlussbericht. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/1342/2011-004-de.pdf>, zuletzt aktualisiert am 02.12.2011, zuletzt geprüft am 31.05.2013.

## Anhang

### Anhang 1: Weiterführende Literatur

#### 0-1: Literatur zu vergleichenden Ökobilanzen von Elektromobilität und konventioneller Mobilität

<b>Titel</b>	<b>Autor/In und Jahr</b>
CO <sub>2</sub> -Minderungspotenziale durch den Einsatz von elektrischen Fahrzeugen in Dienstwagenflotten. Ergebnisbericht im Rahmen des Projekts "Future Fleet".	Kasten, Peter; Zimmer, Wiebke (2011)
Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles.	Hawkins, Troy R.; Singh, Bhawna; Majeau-Bettez, Guillaume; Strømman, Anders Hammer (2012)
Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context.	Boureima, Faycal-Siddikou; Messagie, Maarten; Matheys, Julien; Wynen, Vincent; Sergeant, Nele; van Mierlo, Joeri et al. (2009)
Electric cars: technical characteristics and environmental impacts.	Helmers, Eckard; Marx, Patrick (2012)
Environmental impacts of hybrid and electric vehicles – a review	Hawkins, Troy R.; Gausen, Ola Moa; Strømman, Anders Hammer (2012)
Evaluating the Impact of Advanced Vehicle and Fuel Technologies in U.S. Light-Duty Vehicle Fleet	Bandivadekar, Anup P. (2008)
Full life cycle analysis of market penetration of electricity based vehicles	Baptista, Patricia; Silva, Carla; Goncalves, Goncalo; Farias, Tiago (2009)
Life cycle assessment of electric mobility: answers and challenges.	Frischknecht, Rolf; Flury, Karin (2011)
Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs	Hackney, Jeremy; Neufville, Richard de (2001)
Modelling Material Inventories and Environmental Impacts of Electric Passenger Cars. Comparison of LCA results between electric and conventional vehicle scenarios	Habermacher, Fabienne (2011)
Ökobilanz der Elektromobilität: Analyse des e-Twingos der EKZ	Bauer, Christian; Simons, Andrew (2010)
OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft. Schlussbericht.	Zimmer, Wiebke; Buchert, Matthias; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian; Harthan, Ralph; Hermann, Hauke et al. (2011)
UMBRéLA - Umweltbilanzen Elektromobilität	Helms, Hinrich; Jöhrens, Julia; Hanusch, Jan; Höpfner, Ulrich; Lambrecht, Udo; Pehnt, Martin (2011)
Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen	Althaus, Hans-Joerg; Gauch, Marcel (2010)

#### 0-2: Literatur zur ökologischen Bewertung von Li-Ion Batterien

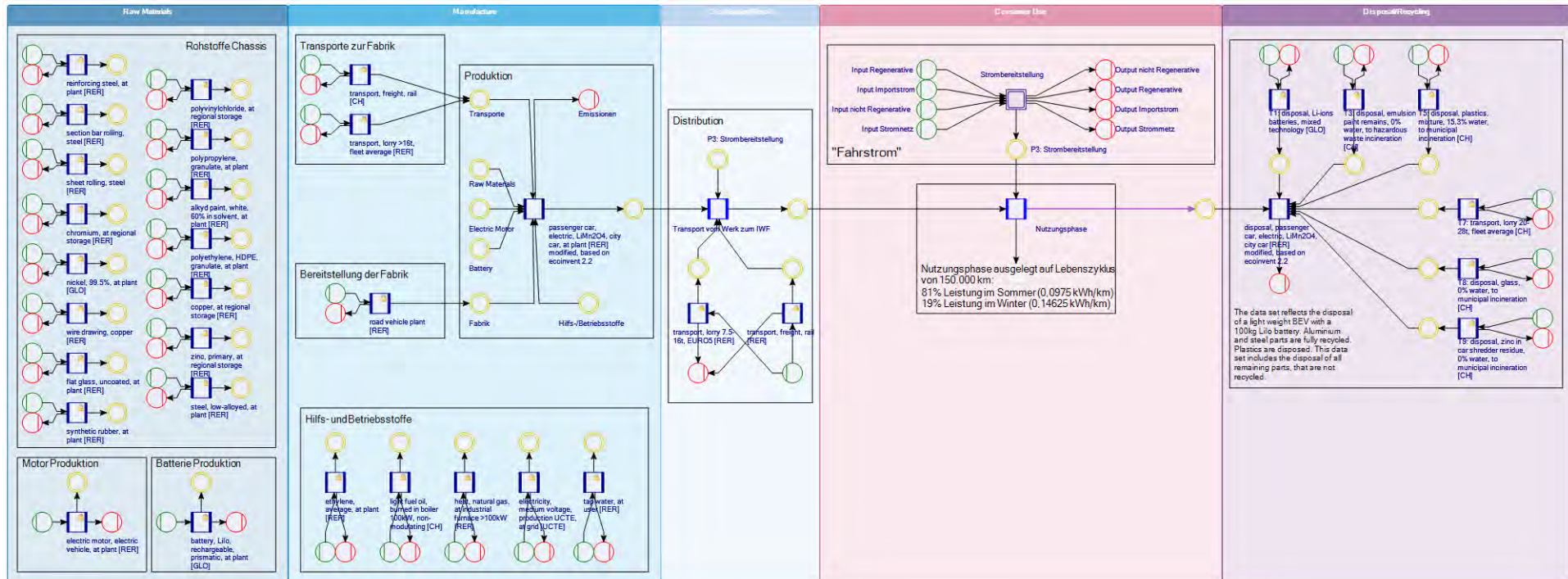
<b>Titel</b>	<b>Autor/In und Jahr</b>
Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles.	Notter, Dominic A.; Gauch, Marcel; Widmer, Rolf; Wäger, Patrick; Stamp, Anna; Zah, Rainer; Althaus, Hans-Jörg (2010)
Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations	Campanari, Stefano; Manzolini, Giampaolo; La Garcia de Iglesia, Fernando (2009)
Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 2. Assessment of electric vehicle and battery technology.	Dulepp, Gopalakrishnan; van Essen, Huib; Kampman, Bettina; Grünig, Max (2011)
Large-Scale Electric Vehicle Battery systems: Long-term metal resource constraints.	Andersson, Björn A.; Rade, Ingrid (1999)
Life Cycle Assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes.	Rantik, Michail (1999)
Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec)	Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Merz, Cornelia; Schüler, Doris (2011)

## Anhang 2: Technische Daten des konventionell betriebenen Flotte des IWF

0-3: Technische Daten des VW Polo V 1.6 TDI Bluemotion (Volkswagen, 2010, S.3)

<b>Hubraum [cm<sup>3</sup>]</b>	1598
<b>Leistung [kW]</b>	66
<b>Getriebe</b>	5-Gang-manuelle
<b>Kraftstoff</b>	Diesel
<b>Emissionsklasse</b>	Euro 5
<b>Max. Drehmoment [Nm] bei 1/min</b>	230 / 1500 – 2500
<b>Leergewicht [kg]</b>	1165
<b>Zuladung [kg]</b>	560
<b>Kraftstoffbehältervolumen [L]</b>	45
<b>Kraftstoffverbrauch laut Hersteller [L/100 km]</b>	
- Innerorts	4,6
- Außerorts	3,2
- Kombiniert	3,7

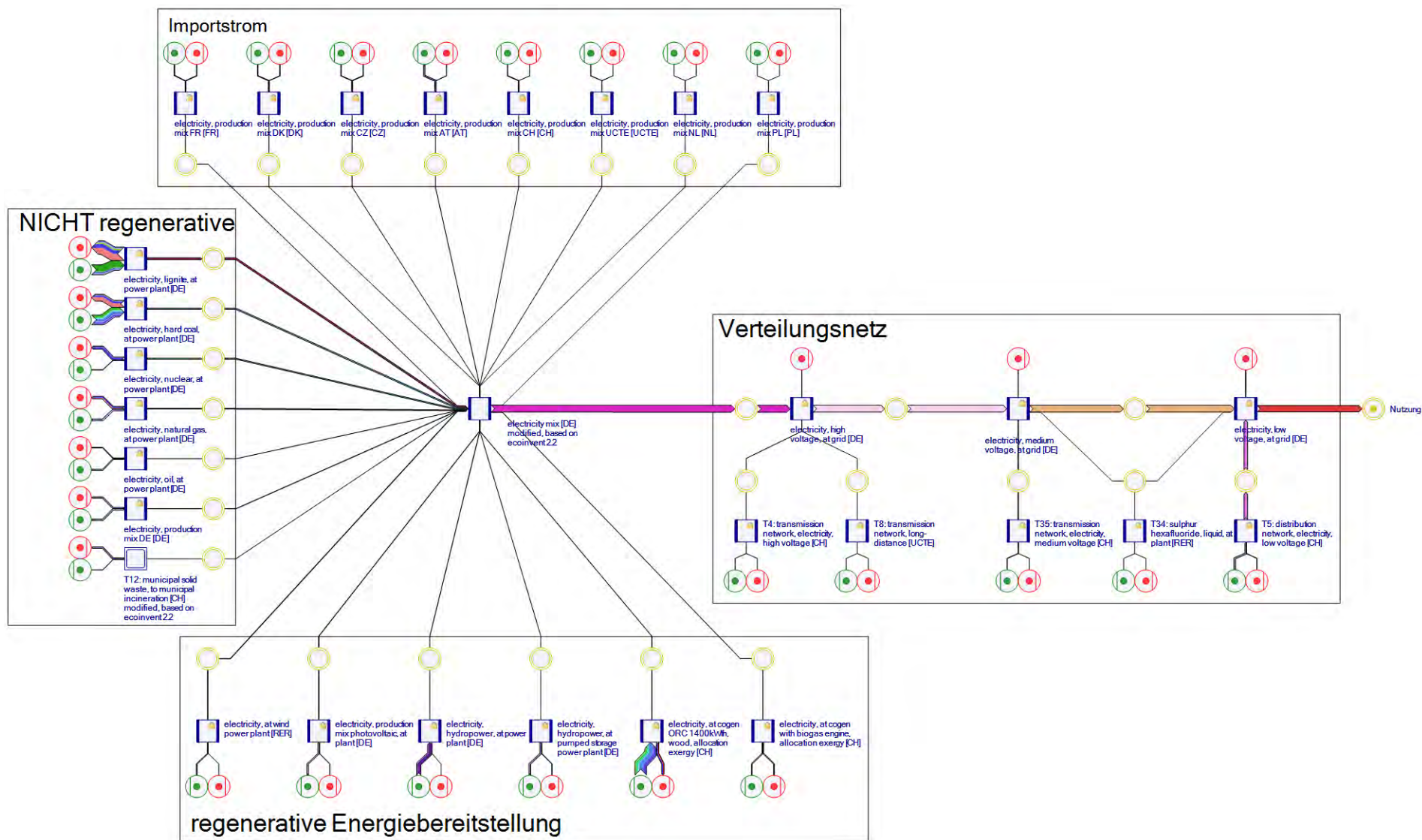
### Anhang 3: Grafische Übersichten der Modellierung in Umberto NXT LCA<sup>23</sup>



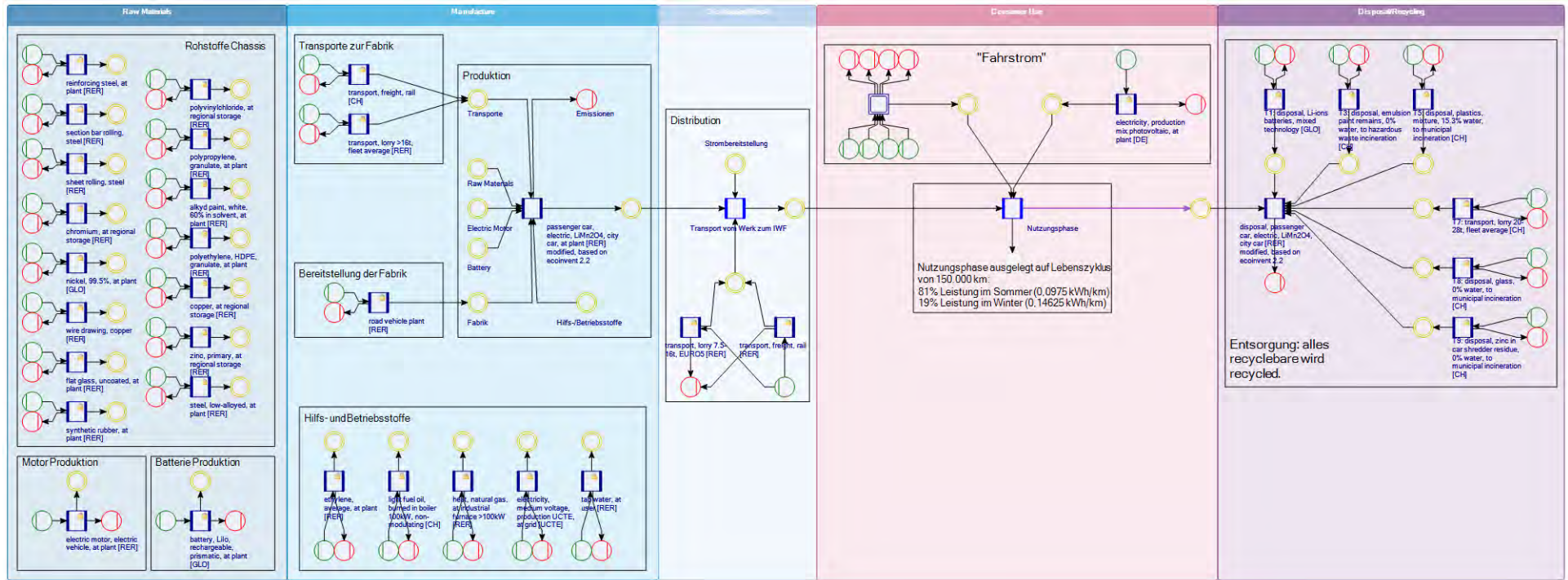
0-1: Modellierung des Szenarios DMix12

<sup>23</sup> Hochauflösende Bilder und die Modelle im \*.umberto Format befinden sich auf der beiliegenden CD-Rom



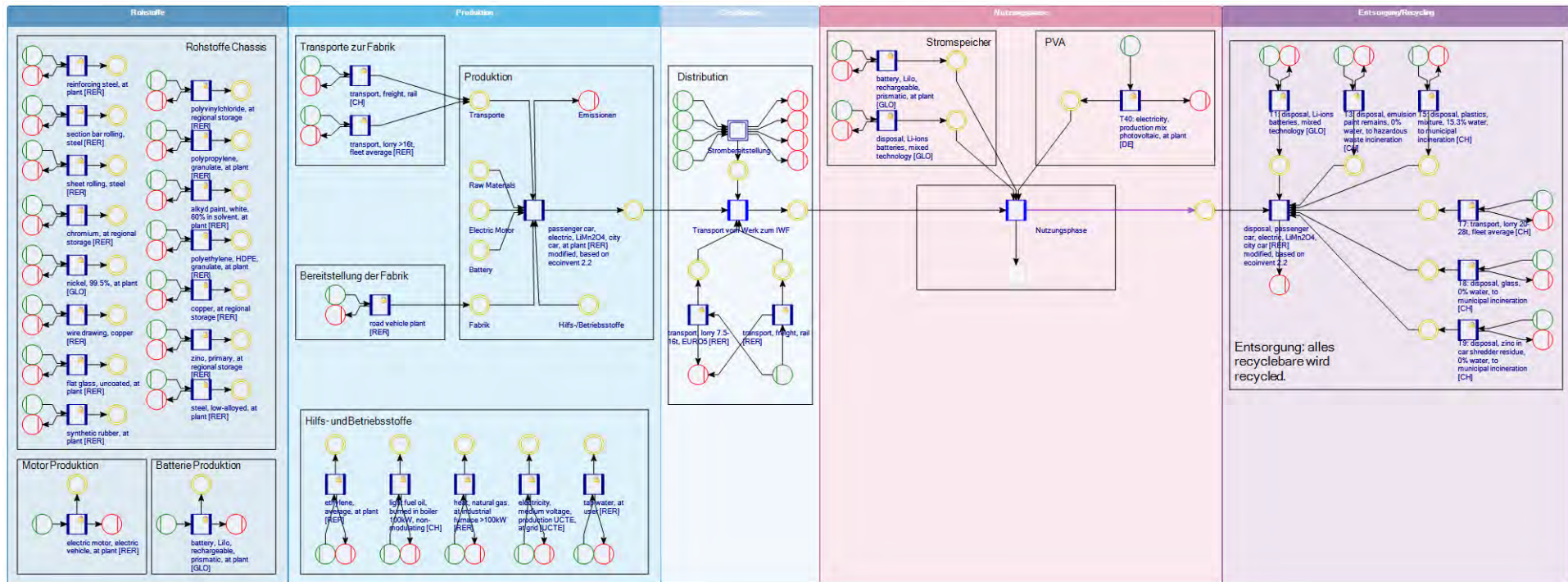


0-2: Modellierung des deutschen Strom-Mix 2012 im Sub-Netz



0-3: Modellierung des Szenarios PVNetz





0-4: Modellierung des Szenarios PVInsel

## Anhang 4: Daten zum deutschen Strom-Mix 2012

0-4: Deutscher Stromgestehungsmix und deutsche Strom-Importe 2012 und ihre Anteile an einem nach ecoinvent-Methode ermittelten Strom-Mix für die Modellierung in Umberto NXT LCA

Energieträger	Strommenge [TWh]		Anteil in [%]	
	Menge Inland	an Inlandserzeugung	an Gesamtsumme	
Braunkohle	159	25,7%		<b>23,95%</b>
Kernenergie	99,5	16,1%		<b>14,99%</b>
Steinkohle	118	19,1%		<b>17,77%</b>
Erdgas	70	11,3%		<b>10,54%</b>
Min. Öl. Prod.	9	1,5%		<b>1,36%</b>
Wind	46	7,4%		<b>6,93%</b>
Wasser	21,2	3,4%		<b>3,19%</b>
Biomasse	36	5,8%		<b>5,42%</b>
PV	28	4,5%		<b>4,22%</b>
Hausmüll	4,9	0,8%		<b>0,74%</b>
übrige Energie	26	4,2%		<b>3,92%</b>
<b>Summe Inlandserzeugung</b>	<b>617,6</b>	<b>100,0%</b>		
Quelle: Destatis 2013				
Bezugsland	Menge Import	an Importmenge		
Frankreich	13,21	28,5%		<b>1,99%</b>
Niederlande	0,74	1,6%		<b>0,11%</b>
Dänemark	8,83	19,1%		<b>1,33%</b>
Schweiz	3,77	8,1%		<b>0,57%</b>
Österreich	8,23	17,8%		<b>1,24%</b>
Polen	0,17	0,4%		<b>0,03%</b>
Tschechische Republik	8,41	18,2%		<b>1,27%</b>
Sonstige Länder	2,91	6,3%		<b>0,44%</b>
<b>Summe Import</b>	<b>46,28</b>	<b>100,0%</b>		
Quelle: AGEb 2013				
<b>Gesamtsumme Energieträger + Import</b>	<b>663,88</b>			<b>100%</b>