35. Symposium - Photovoltaische Solarenergie

Ökobilanz eines Solarwechselrichters

Leonhard Probst, Laëtitia Liardet und Gilles Rouffaud
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Tel. 0761 4588-2059
leonhard.probst@ise.fraunhofer.de

1 Einleitung

Die Elektronik hat in den letzten Jahren/Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen und ist aus dem heutigen Alltag kaum mehr wegzudenken. Mit steigender Marktdurchdringung wächst jedoch auch die Notwendigkeit einer detaillierten Abschätzung der Auswirkungen auf Natur und Umwelt. Dies kann mit der Ökobilanzierung von Elektronikprodukten erreicht werden, welche die gesamte Lebensdauer des Produkts betrachtet. Bei der Betrachtung von Solarwechselrichtern sind die wichtigsten Kriterien das Recycling, die verwendeten kritischen Materialen, aber auch die Energierücklaufzeit, d.h. wie lange der Wechselrichter betrieben werden muss bis die gleiche Energiemenge erzeugt ist, welche für dessen Produktion aufgewendet werden musste.

Die Ökobilanzierung hat ihren Ursprung in den 1960er Jahren und wurde 1997 mit der ISO 14000 standardisiert. Sie besteht aus den vier in Abb. 1 gezeigten Schritten. Eine Ökobilanzierung ist dabei keinesfalls ein linearer Ablauf, sondern es gibt stets Rückwirkungen von einem Schritt auf die jeweils anderen. Der Ablauf der Ökobilanzierung kann deshalb als iterativer Prozess beschrieben werden. Ein häufiges Problem bei der Ökobilanzierung – vor allem in Bereichen mit schnellem technischem Fortschritt – ist die Verwendung veralteter Modelle, da viele Hersteller keinen Mehrwert darin sehen ihre aktuellen Produktionsprozesse oder die Zusammensetzung ihrer Produkte offenzulegen. Diese Arbeit analysiert das Labormuster eines Wechselrichters, welcher im Jahr 2015 am Fraunhofer ISE entwickelt wurde. Dadurch soll

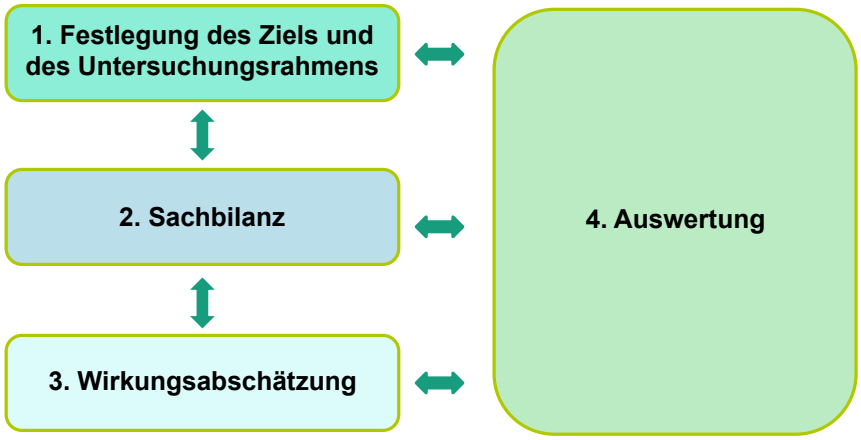

Abb. 1: Der iterative Prozess einer Ökobilanzierung

ein aktuelles Referenzmodell vorgestellt werden, das beispielhaft für die Berechnung des Wechselrichteranteils der CO_2-Intensität von Solarstrom verwendet werden kann, d.h. wie viel CO_2eq pro erzeugter kWh Solarstrom emittiert werden.

2 3-phasiger Wechselrichter mit Siliziumkarbid-Transistoren

In dieser Analyse wurde ein Labormuster eines 3-phasigen Wechselrichters mit SiC-Transistoren und einer Nennleistung von 10 kVA untersucht, welches in Abb. 2 dargestellt ist. Mit einer Schaltfrequenz von 100 kHz und einem Gewicht von 4,5 kg ist dieser Wechselrichter vergleichbar mit aktuell am Markt verfügbaren Modellen und eignet sich deshalb besonders für diese Untersuchung in Hinsicht Aktualität des Modells.

Abb. 2: Der untersuchte 3-phasige Wechselrichter mit Siliziumkarbid-Transistoren

Die weiteren technischen Parameter sind in Tab. 1 zusammengefasst. Dieser Wechselrichter verwendet Halbleiter des Herstellers ROHM, die in Module der Firma Vincotech verbaut wurden. Durch die Verwendung von Leistungshalbleitern mit hoher Bandlücke konnte die Taktfrequenz auf 100 kHz gesteigert und dadurch die Größe der passiven Bauelemente verringert werden. Der Wechselrichter erreicht einen maximalen Wirkungsgrad von 98,7 % und verwendet eine T-Type NPC Topologie. Dabei müssen die äußeren Schalter die volle Zwischenkreisspannung sperren können und die inneren Transistoren nur jeweils die Hälfte der Zwischenkreisspannung. Der untersuchte Wechselrichter beinhaltet derzeit noch kein Gehäuse und auch keinen PV-Eingangssteller, welche für eine vergleichende Betrachtung mit anderen Solarwechselrichtern mit berücksichtigt werden sollten.

Parameter	**Wert**
Abmessungen	230x210x110 mm
Gewicht	4,5 kg
Leistung	10 kVA
Schaltfrequenz	100 kHz
Max. Eingangsspannung	1000 V
Ausgangsspannung	230 V
Frequenz	50 Hz
Topologie	TNPC
Überlastfähigkeit	120 % für 30 s

Tab. 1: Technische Parameter des untersuchten 3-phasigen Wechselrichters

3 Ökobilanzierung von Solarwechselrichtern

Für den umweltgerechten Entwurf von Solarwechselrichtern wurde bereits 2012 vom Ökoinstitut eine Studie mit dem Titel „Photovoltaik Wechselrichter - Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen“ durchgeführt, in welcher die Vergabekriterien zur Zertifizierung nach dem „Blauen Engel“ des Bundesumweltministeriums (BMU) herausgearbeitet wurden [1]. Der „Blaue Engel“ wird seit 1978 vergeben und ist ein Umweltzeichen für besonders umweltschonende Produkte und Dienstleistungen eines bestimmten Bereiches.

Bis in das Jahr 2018 wurde allerdings kein einziger Solarwechselrichter nach dem „blauen Engel“ zertifiziert und die Kategorie „Solarwechselrichter“ wurde daraufhin nach Aussage des BMU mangels Interesse eingestellt. Von Oktober 2017 bis Ende 2019 wurde auf europäischer Ebene in Form eines „Joint Research Councils“ eine vorbereitende Studie zur Umsetzung von Ökodesign, eines Energielabels und der grünen öffentlichen Beschaffung im Bereich „Photovoltaik-Module, Wechselrichter und Systeme“ durchgeführt [2]. In Abb. 3 sind die unterschiedlichen Politikinstrumente der europäischen Union zur Förderung bzw. Sicherstellung der Nachhaltigkeit von Solarprodukten zusammengefasst.

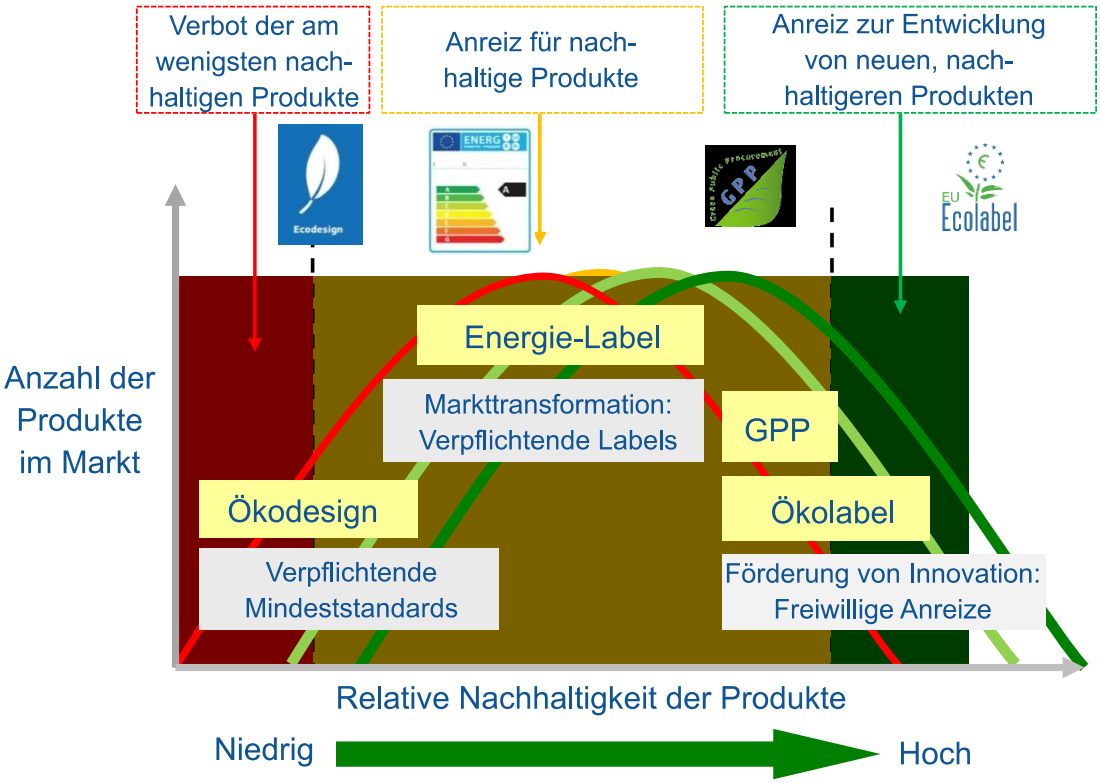

Abb. 3: Politische Instrumente der europäischen Union zur Förderung der Nachhaltigkeit bei Solarprodukten (nach [3])

In dieser vorbereitenden Studie wurden Vorschläge ausgearbeitet, die nun den einzelnen Gremien für die unterschiedlichen Bereiche (Ökodesign, Energie-Label, öffentliche Beschaffung) vorgelegt werden. Derzeit existiert allerdings noch kein rechtlicher Rahmen auf europäischer Ebene zur Nachhaltigkeit von Solarprodukten die über generelle Vorschriften hinausgehen.

3.1 Rechtlicher Rahmen, verwendete Datenbanken und Leitfäden

Auch wenn auf europäischer Ebene noch keine einheitlichen Standards für Solarwechselrichter etabliert sind, unterliegen diese den Gesetzgebungen für Elektronikprodukte im Allgemeinen. Dabei sind die drei bedeutendsten Richtlinien in diesem Bereich:

1) **WEEE**-Richtlinie (**W**aste of **E**lectrical and **E**lectronic **E**quipment)

   Legt Mindestnormen für die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten in der EU fest

2) **RoHS**-Richtlinien (**R**estriction **o**f **H**azardous **S**ubstances)

   Beschränkt die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten

3) **REACH**-Verordnung (**R**egistration, **E**valuation, **A**uthorisation and Restriction of **Ch**emicals)

   Ist eine EU-Chemikalienverordnung nach dem Prinzip „no data, no market“, hiernach dürfen innerhalb des Geltungsbereiches nur noch chemische Stoffe in Verkehr gebracht werden, die vorher registriert worden sind

Es gibt diverse Softwareprogramme zur Durchführung von Ökobilanzierungen, welche sich hauptsächlich durch den Umfang ihrer Datenbanken und der verwendeten Analysemethoden unterscheiden. Im Bereich der Elektronik sind dabei vor allem die Datenbanken von „ecoinvent“, betrieben von einer Non-Profit-Organisation aus der Schweiz, und „EIME[1]“ von Bureau Veritas aus Frankreich relevant. Die nachfolgenden Untersuchungen basieren – wenn nicht anders angegeben – auf Werten aus der Datenbank von „EIME v5.5“.

[1] **E**nvironmental **I**mprovement **M**ade **E**asy; www.codde.fr

Die europäische Kommission hat im Jahr 2010 ein „Handbuch über vorbildliche Verfahren der LCA[2]“ herausgegeben, das sogenannte ILCD[3]-Handbuch [4, 5]. Dieses von der gemeinsamen Forschungsstelle der Kommission in Zusammenarbeit mit der Generaldirektion Umwelt erarbeitete Handbuch bietet Leitlinien für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen zur Quantifizierung der Emissionen, des Rohstoffverbrauchs und der Umweltauswirkungen von Produkten. Die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden nach diesen Leitlinien durchgeführt.

3.2 Bereits existierende Ökobilanzen von Wechselrichtern

Den Autoren sind im Bereich der Solar-Wechselrichter zwei wichtige Veröffentlichungen bekannt:

Tschümperlin et al. veröffentlichten 2016 eine aktualisierte Version einer Ökobilanz für einen 2,5 kW Solarwechselrichter, dessen Ergebnisse auch auf 5 – 20 kW extrapoliert wurden [6]. Es wurde dabei eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen, die eigentliche Nutzungsphase wurde dabei nicht betrachtet Bei dieser Analyse wurde auf die „ecoinvent“-Datenbank in der Version 2.2 zurückgegriffen. Der Aufbau wurde durch Abfrage bei drei europäischen Wechselrichterherstellern abgeleitet. Ziel dieser Studie war es, das existierende „ecoinvent“-Modell für Solarwechselrichter zu aktualisieren.

Anders Nordelöf et al. haben 2017 eine Ökobilanz für Antriebsumrichter von Elektroautos im Leistungsbereich von 20 – 200 kW veröffentlicht [7]. Hier wurde sowohl die Betrachtung der Nutzungsphase wie auch der Entsorgung „End of life“ nicht betrachtet. Bei der Analyse wurde auf die „ecoinvent“-Datenbank in der Version 3.0 zurückgegriffen. Der Aufbau des Wechselrichters wurde durch Interviews von Experten, Produktdatenblätter, Literaturvergleich und Fabrikbesuche abgeleitet. Das Ziel dieser Studie war die Entwicklung eines skalierbaren Wechselrichter-Modells für die Automobilindustrie.

Diese Arbeit soll ein aktualisiertes Modell mit nachvollziehbarer Technologie und Annahmen für Solarwechselrichter bereitstellen. Des Weiteren erlauben Untersuchungen an einem Labormuster Verbesserungspotenziale direkt aufzuzeigen, wie beispielsweise die Fußabdrücke in einzelnen Wirkkategorien gesenkt werden können. Ziel der Untersuchung ist es zum einen die Umweltauswirkungen von Solarwechselrichtern abschätzen zu können, aber auch Handlungsoptionen aufzuzeigen, wie diese möglichst verringert werden können.

---

[2] **L**ife **C**ycle **A**nalysis (Ökobilanzierung)

[3] **I**nternational Reference **L**ife **C**ycle **D**ata System

3.2 Ablauf einer Ökobilanzierung

Die einzelnen Stufen im Lebenszyklus eines Wechselrichters mit den entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen sind in Abb. 4 dargestellt. Er umfasst sowohl die Herstellung, die Verwendung, die Entsorgung als auch das Recycling. Die Ökobilanzierung ist eine Methode um die Umweltauswirkungen während all dieser Stufen zu betrachten. Die wirtschaftlichen und sozialen Implikationen werden dabei zumeist außen vor gelassen, auch wenn es zwischen diesen Bereichen natürlich Gemeinsamkeiten gibt.

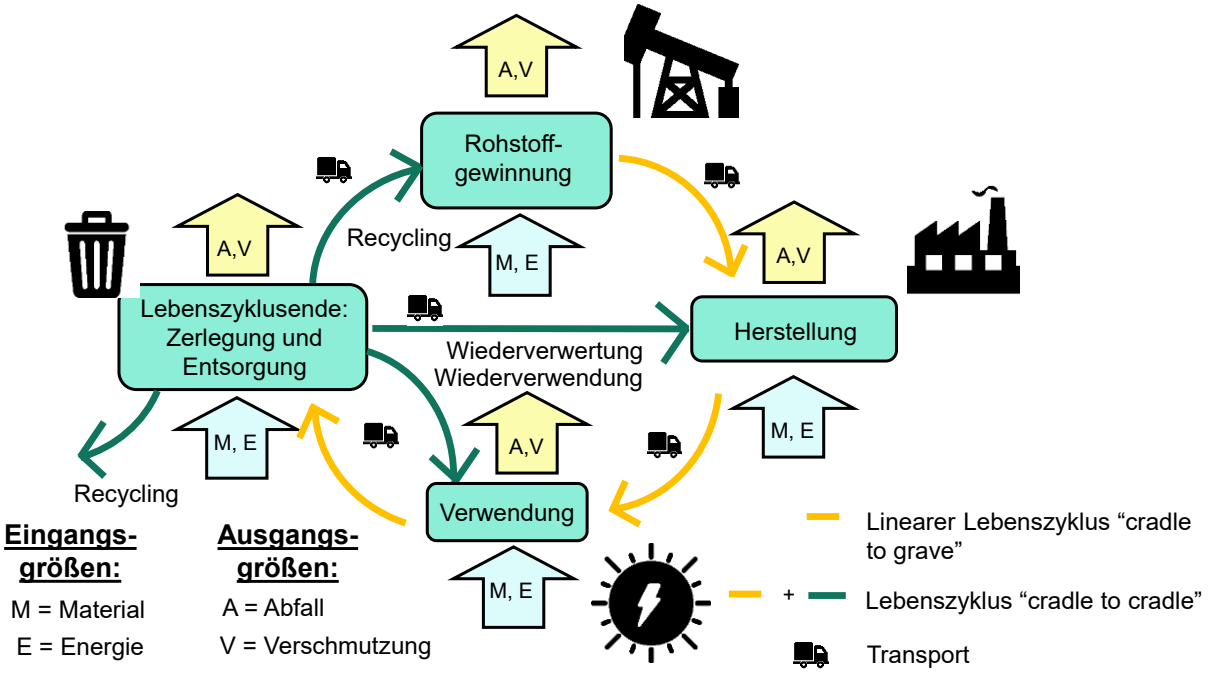

Abb. 4: Stufen des Lebenszyklus mit entsprechenden Ein- und Ausgangsgrößen der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung ist dabei ein iterativer Prozess der aus den vier einzelnen Schritten besteht (vgl. Abb. 1):

1) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

   Hier wird der Untersuchungsrahmen festgelegt und die genauen Ziele der Untersuchung definiert

2) Aufstellen der Sachbilanz

   Bestandsaufnahme aller verbrauchten Ressourcen und der Emissionen für jede Stufe des Lebenszyklus

3) Wirkungsabschätzung

   Auswahl der Indikatoren (Wirkgrößen) und der dahinterliegenden Berechnungsmethoden; Berechnung der Wirkgrößen aus den Sachbilanzen

4) Auswertung

   Bewertung der Ergebnisse und Vergleich mit den definierten Zielen

3.3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Das Ziel der Untersuchung ist zum einen die kritischen Komponenten und deren Auswirkungen eines Solarwechselrichters aufzuzeigen, zum anderen aber auch Potenziale zu ermitteln, wie diese verringert werden können.

Der Untersuchungsrahmen in dieser Arbeit ist nur der Wechselrichter selbst. Die Nutzungsphase und somit die Auswirkungen der Benutzung des Wechselrichters während seiner Lebensdauer wurden vernachlässigt. Ein Beispiel wären hier die eingesparten CO_2-Emissionen durch Verdrängung fossiler Energieerzeugung im Stromnetz. Die Betrachtung der Nutzungsphase ist im Besonderen von Bedeutung, wenn unterschiedliche Solarwechselrichter miteinander verglichen werden sollen. Es stellt sich beispielsweise die Frage, in wie weit die Auswirkungen der Herstellung, die Lebensdauer und die geringeren Energieverluste durch einen höheren Umwandlungswirkungsgrad zueinander in Beziehung stehen. Die ausführliche Betrachtung der Nutzungsphase wurde hier vorerst außen vor gelassen um die Komplexität zu reduzieren, soll jedoch in späteren Arbeiten untersucht werden.

Zur Modellierung der Bestandteile des Wechselrichters wurde auf die Ökobilanz-Datenbank von EIME zurückgegriffen, wobei darin nicht enthaltene Komponenten wie weiter unten beschrieben modelliert wurden.

3.4 Aufstellen der Sachbilanz

Die Sachbilanz basiert zuallererst auf der Stückliste des Labormusters inklusive der verwendeten Leiterplatten. Falls keine passenden Modelle für die Komponenten in der EIME-Datenbank gefunden werden konnten, wurde nach zwei unterschiedlichen Strategien vorgegangen:

1) Modellierung durch **vergleichbare Komponenten**

   So wurden beispielsweise die Zinkoxid-Varistoren durch ein Modell für Zinnoxid-Varistoren abgebildet

2) Erstellung eines Modells basierend auf der **Materialzusammensetzung**

   Basierend auf Herstellerangaben oder durch „Reverse Engineering“ wurde die Zusammensetzung und die Herstellung der Komponente nachgebildet. Vor allem die Abschätzung des Verbrauchs von Stoffen (z.B. von Chemikalien) währen der Produktion der Komponenten lässt sich hierbei nicht genau abbilden.

Die Modellierung der wichtigsten Komponenten / Lebenszyklen soll im Folgenden näher erläutert werden.

Leiterplatten

Der Wechselrichter besteht hauptsächlich aus zwei Leiterplatten, einer Ebene für den AC-Teil und eine für den DC-Teil. Die Kupferflächen können relativ einfach aus den Leiterplatten-Layouts extrahiert werden und daraus die Gesamtkupfermenge berechnet werden. Die Leiterplatten wurden anschließend basierend auf ihrer Materialzusammensetzung modelliert.

Leistungsmodule

Leider existiert in der EIME-Datenbank kein Modell für Leistungsmodule. Basierend auf den Bestandteilen der Leistungsmodule wurde der Herstellungsprozess modelliert. Wichtige Hinweise auf den Herstellungsprozess wurden dabei der Nordelöf-Datenbank entnommen [7].

Transport

Es wurde versucht bei allen Komponenten das Herkunftsland zu ermitteln. Bei allen anderen Komponenten wurden Annäherungen wie von EIME empfohlen verwendet, die nur zwischen Deutschland, Europa und Rest der Welt unterscheiden.

Entsorgung und Recycling

Der Abfall fällt nicht nur bei der Entsorgung des Wechselrichters, sondern praktisch in allen Lebenszyklen an. Nichtsdestotrotz ist die Abfall-Vorbehandlung (nach WEEE vorgeschrieben [8]) der Schritt mit den größten Umweltauswirkungen.

Zur Modellierung der Entsorgung wurde die sogenannte „Stock method“ verwendet. Dabei werden die nicht-recycelbaren Bestandteile dem Untersuchungsobjekt zugeordnet, die Kosten für die recycelten Komponenten jedoch dem Produkt, das diese auch später verwendet.

3.5 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung hängt stark von den jeweils betrachteten Wirkkategorien ab. Die Software EIME berücksichtigt dabei die folgenden neun Wirkkategorien, die auch für den sogenannten „PEP[4] ecopassport“ verwendet werden:

1) **Versauerungspotenzial** für Wasser und Boden

   Fasst alle Emissionen zusammen, die den pH-Wert von Wasser und Boden verändern (Einheit ist kg SO_2 (Schwefeldioxid)-Äquivalent)

2) **Abiotischer Ressourcenverbrauch**

   Beschreibt den Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen wie beispielsweise Mineralien (Einheit ist kg Sb (Antimon)-Äquivalent)

3) **Abiotischer Ressourcenverbrauch für fossile Energieträger**

   Verbrauch von Gas, Kohle, Öl und Torf (Einheit ist MJ)

4) **Luftverschmutzung**

   Volumen an Luft die benötigt wird um die Emissionen so zu verdünnen, so dass diese den rechtlichen Grenzwerten entsprechen (Einheit ist m^3)

5) **Eutrophierung**

   Anreicherung von Nährstoffen und Mineralien im Wasserkörper, die zu einem übermäßigen Wachstum von Algen führt. Dieser Prozess kann zu einem Sauerstoffmangel im Wasser führen. (Einheit ist kg PO_4 (Phosphat)-Äquivalent)

6) **Treibhauspotenzial**

   Fasst die Treibhausgas-Emissionen zusammen (Einheit ist kg CO_2-Äquivalent)

7) **Ozonabbaupotenzial**

   Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW)-Emissionen die zum Abbau der oberen Ozonschicht führen, welche für den Schutz vor gefährlicher UV-Strahlung von Bedeutung ist (Einheit ist 11 kg FCKW-Äquivalente)

[4] Product Environmental Profile

8) **Photochemisches Ozonbildungspotenzial**

   Bildung von atmosphärischen Schadstoffen wie z.B. Ozon oder andere oxidierende Bestandteile der Luft die zur Entstehung von Smog beitragen (Einheit ist kg C_2H_4 (Ethylen)-Äquivalent)

9) Wasserverschmutzung

   Menge an Wasser, welches zur Verdünnung benötigt wird, um die rechtlichen Grenzwerte einhalten zu können (Einheit ist m^3)

All diese Wirkkategorien hängen natürlich auch miteinander zusammen, so ist beispielsweise einer der Hauptgründe für Boden- und Wasserversauerung die Verbrennung von fossilen Energieträgern und eine der zentralen Auswirkungen der Eutrophierung ist die Versauerung von Wasserkörpern.

4 Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

Die einzelnen Bestandteile der Ökobilanzierung werden zuerst in folgende Kategorien eingeteilt:

1) Leiterplatten
2) Komponenten
3) Lötprozess
4) Transport

Die einzelnen Komponenten werden daraufhin noch in verschiedene Gruppen gegliedert:

1) Passive Bauteile (jeweils für Signal- und Leistungsbereich)
2) Aktive Bauteile (jeweils für Signal- und Leistungsbereich)
3) Stecker und Verbinder
4) Mechanische Komponenten
5) Elektromechanische Komponenten

Die eigentliche Analyse wird nun in zwei Schritten durchgeführt, die in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben werden.

4.1 Analyse der Komponentengruppen

Die Analyse der Auswirkungen der Komponentengruppen auf die unterschiedlichen Wirkkategorien hat das Ziel, zuerst einen Überblick der Verteilung der einzelnen Gruppen auf die Umweltauswirkungen zu erhalten. In Abb. 5 sind die Ergebnisse für die unterschiedlichen Komponentengruppen angegeben.

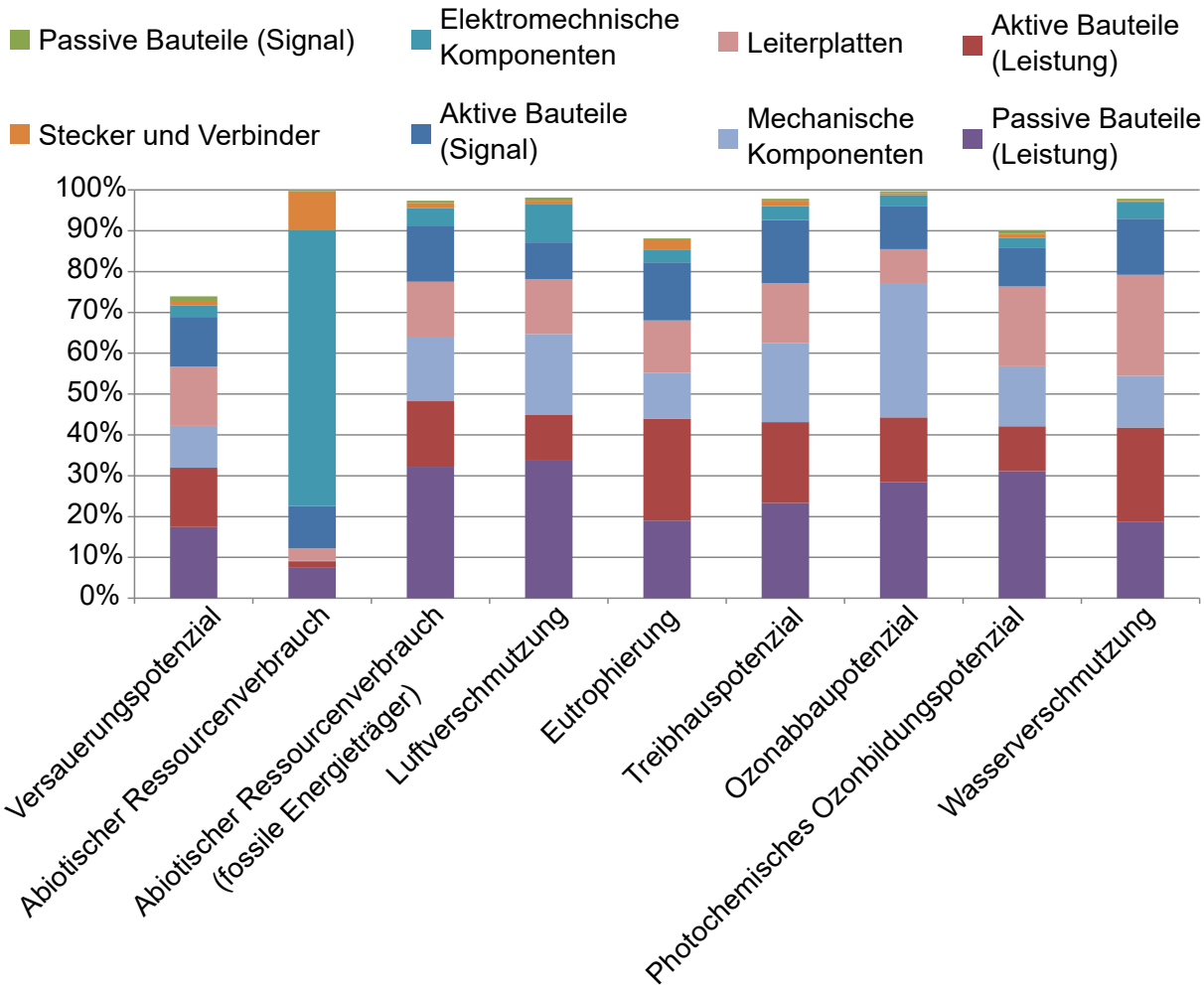

Abb. 5: Relative Ergebnisse der Ökobilanzierung der unterschiedlichen Wirkkategorien und deren Aufteilung auf die Komponentengruppen; es wird nicht immer 100 % erreicht, da die Komponenten nicht den ganzen Lebenszyklus abbilden, es fehlt beispielsweise die Herstellung, die Entsorgung oder auch der Transport

Eine numerische Auswertung dieser Ergebnisse erfolgt in Tab. 2. Dabei ist die kumulative Wirkung bestimmt durch die Aufsummierung der relativen Anteile in den einzelnen Wirkkategorien. Zudem wurde die Standardabweichung der einzelnen Werte berechnet. Diese zeigen bei einigen Kategorien große Unterschiede. Beispielsweise lässt sich die große Standardabweichung für die elektromechanischen Komponenten durch die sehr starken Auswirkungen der Relais auf den abiotischen Ressourcenverbrauch erklären (bei den betrachteten Relais bedingt durch Antimon und Silber).

Unterkategorie	Kumulative Wirkung	Standard-abweichung	Mittlere Wirkung	Bedeutendste Wirk-kategorie
Passive Bauteile (Leistung)	211,5%	8,6%	23,5%	Luftverschmutzung
Aktive Bauteile (Leistung)	137,9%	7,1%	15,3%	Eutrophierung
Mechanische Kom-ponenten	136,4%	8,8%	15,2%	Ozonabbaupotenzial
Leiterplatten	124,8%	6,1%	13,9%	Wasserverschmutzung
Aktive Bauteile (Signal)	108,4%	2,3%	12,0%	Treibhauspotenzial
Elektromechanische Komponenten	100,0%	21,3%	11,1%	Abiotischer Ressour-cenverbrauch
Stecker und Verbin-der	18,4%	2,9%	2,1%	Abiotischer Ressour-cenverbrauch
Passive Bauteile (Signal)	5,3%	0,2%	0,6%	Versauerungspotenzial

Tab. 2: Numerische Auswertung der Ergebnisse wichtiger Komponentengruppen

4.2 Analyse der Komponenten

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Analyse der Komponentengruppen können nun die Auswirkungen auf die einzelnen Komponenten betrachtet werden. Diese sind für die wichtigsten Komponenten in Abb. 6 dargestellt. Dabei sind die Komponenten mit den größten kumulativen Auswirkungen die Leistungsdrosseln, die Leiterplatten und der Kühlkörper. Als genereller Trend ist auffällig, dass größere und schwere Komponenten auch die größten Umweltauswirkungen verursachen. Dazu gibt es allerdings eine größere Ausnahme bei den Halbleiterbauelementen, für deren Produktion sehr große Mengen an Energie und Wasser benötigt werden [9]. Diese Ergebnisse wurden auch in der Studie von Tschümperlin et al. [6] bestätigt, in der ebenfalls die Mikrochips und die Leiterplatten als bedeutende Komponenten identifiziert wurden.

Diese Analyse kann auch für die einzelnen Wirkkategorien durchgeführt werden. In Abb. 10 ist dies exemplarisch für das Treibhauspotenzial angegeben. Dabei haben der Kühlkörper und die Leistungsmodule besonders starke Auswirkungen auf diese Wirkkategorie. Die Ergebnisse für alle anderen Kategorien sind im Anhang B zu finden.

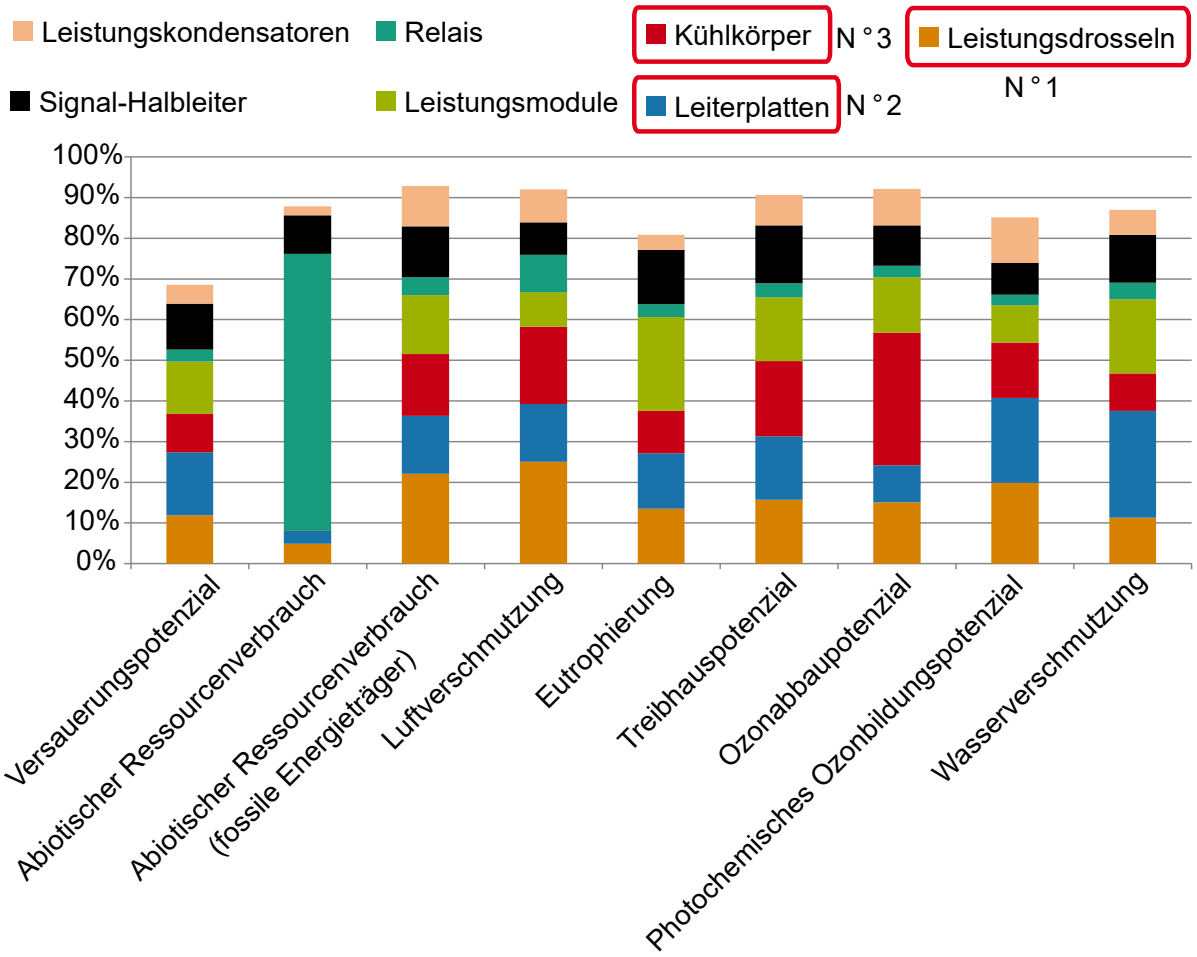

Abb. 6: Relative Ergebnisse der Ökobilanzierung der unterschiedlichen Wirkkategorien und deren Aufteilung auf die Komponenten; die wichtigsten Komponenten für die Umweltauswirkungen sind dabei die Leistungsdrosseln, die Leiterplatten und der Kühlkörper

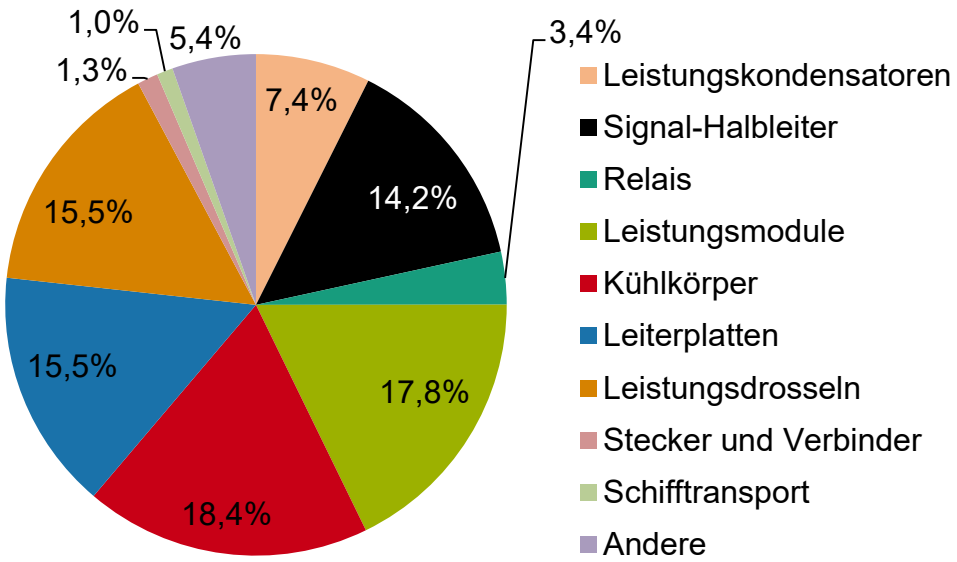

Abb. 7: Auswirkungen der einzelnen Unterkategorien auf die Wirkkategorie des Treibhauspotenzials

Komponenten	Kumulative Wirkung	Standardabweichung	Mittlere Wirkung	Bedeutendste Wirkkategorie
Leistungsdrosseln	138,0%	6,1%	15,3%	Luftverschmutzung
Leiterplatten	131,5%	6,4%	14,6%	Wasserverschmutzung
Kühlkörper	127,2%	8,9%	14,1%	Ozonabbaupotenzial
Leistungsmodule	114,7%	6,5%	12,7%	Eutrophierung
Relais	100,0%	21,3%	11,1%	Abiotischer Ressourcenverbrauch
Signal-Halbleiter	97,6%	2,3%	10,8%	Treibhauspotenzial
Leistungskondensatoren	61,9%	3,0%	6,9%	Photochemisches Ozonbildungspotenzial

Tab. 3: Numerische Auswertung der einzelnen Komponenten mit Angabe jeweils der bedeutendsten Wirkkategorie für die einzelnen Komponenten

Eine ähnliche quantitative Auswertung wie schon im vorherigen Kapitel wurde auch für die einzelnen Komponenten durchgeführt, welche Tab. 3 entnommen werden kann. Dabei ist vor allem auffällig, dass die einzelnen Komponenten teilweise sehr unterschiedliche Auswirkungen haben (vgl. „bedeutendste Wirkkategorie“).

4.3 Grenzen des Modells

Die Verwendung von Modellen basierend auf der Materialzusammensetzung für einige Komponenten, für die keine geeigneten Referenzmodelle gefunden werden konnten, erhöht die Unsicherheit der Ergebnisse, vor allem für Komponenten mit großen Umweltauswirkungen wie beispielsweise den Leistungsmodulen und den Leistungsdrosseln. Hierfür wären geeignete Ökobilanzierungen für diese Komponenten als Grundlage sicherlich sehr hilfreich.

Auch die Modellierung der Transportwege ist nicht hinreichend für ein kommerzielles Produkt, unterliegt aber in dieser Analyse der Einschränkung, dass nur ein Labormuster untersucht wurde, für den es schwierig war, die Transportwege für die Produktion und Verteilung zum Kunden zu berücksichtigen. Zudem führt die Modellierung der Entsorgung nach der sogenannten „Stock method“ eher zu einer Unterbewertung des Aufwands am Produktende, da keine Kosten für alle recycelbaren Materialien anfallen.

4.4 Fallstudie 1: Recyceltes Aluminium für den Kühlkörper

Basierend auf den bereits gezeigten Ergebnissen, sollen noch zwei einfache Beispiele gezeigt werden, wie sich Entscheidungen beim Entwurf des Wechselrichters auf dessen Ökobilanz auswirken können.

Der Kühlkörper trägt beispielsweise mit 18,4 % zum Treibhauspotenzial des Wechselrichters bei (vgl. Abb. 7). Hier kann beispielsweise schon eine deutlich geringere Umweltauswirkung erreicht werden, wenn statt Primäraluminium auf recyceltes Material zurückgegriffen wird. Abb. 8 zeigt diesen Vergleich für die unterschiedlichen Wirkkategorien.

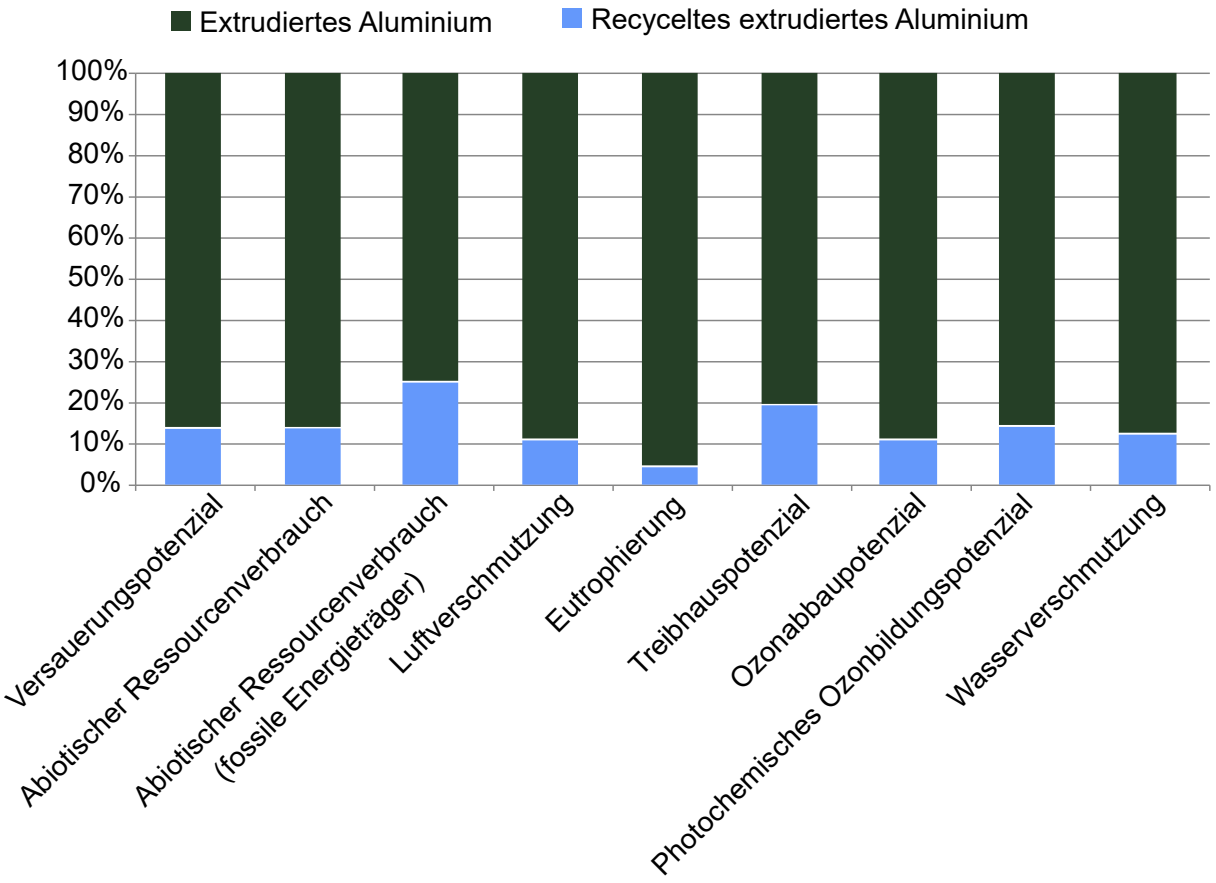

Abb. 8: Vergleich der Umweltauswirkungen bei Verwendung eines Kühlkörpers aus Primäraluminium oder aus recyceltem Material

4.5 Fallstudie 2: Austausch von Elektrolyt-Kondensatoren mit Folienkondensatoren

In Abb. 9 ist der Vergleich bei der Verwendung von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren mit Folienkondensatoren als Zwischenkreispuffer dargestellt. Die unterschiedliche Lebensdauer der Kondensatoren wurde bei gleichen Umweltbedingungen mitskaliert. Um eine vergleichbare Lebensdauer zu erreichen wurde eine

entsprechend größere Menge an Elektrolyt-Kondensatoren berücksichtigt. Diese Skalierbarkeit ist zwar auf Komponentenebene möglich, wird aber umso schwieriger, wenn das komplette System betrachtet wird. In diesem einfachen Vergleich ist zu erkennen, dass Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren vor allem hinsichtlich des Rohstoffverbrauchs vorteilhaft sein können.

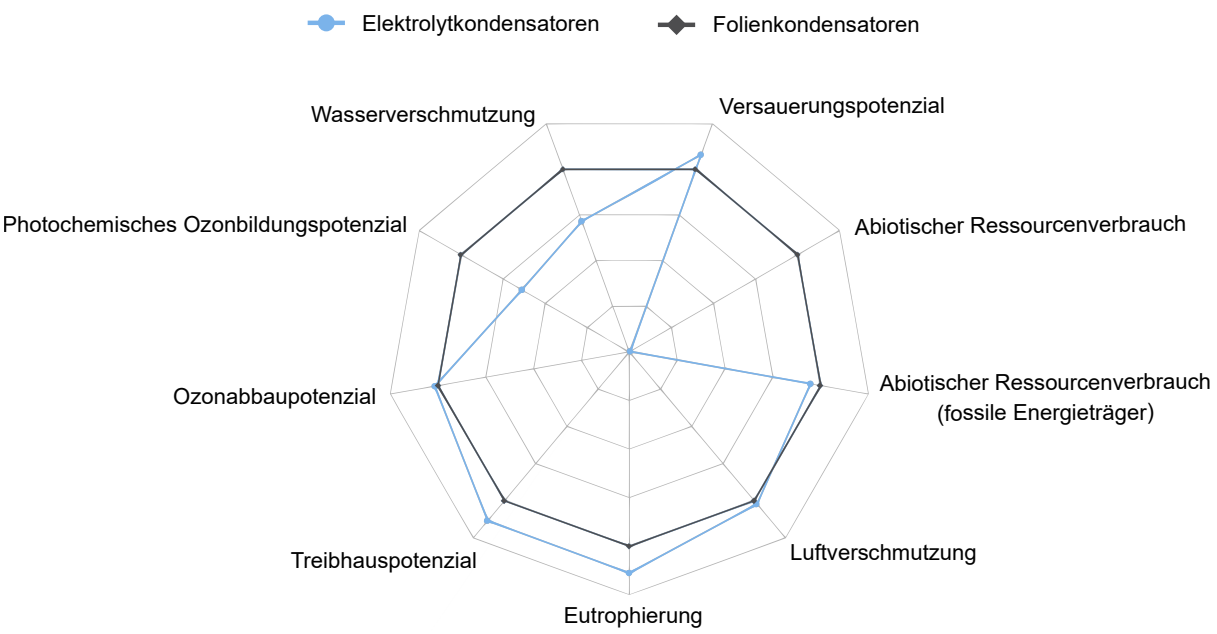

Abb. 9: Vergleich von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren mit Folienkondensatoren hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das generelle Vorgehen bei der Ökobilanzierung von leistungselektronischen Produkten beschrieben und darauf aufbauend das Vorgehen an einem Labormuster demonstriert. Auf Basis dessen wurden erste Ergebnisse präsentiert und zwei Fallstudien daran durchgeführt.

Die Modellierung der Leistungsmodule war eine besondere Herausforderung bei der Erstellung der Ökobilanzierung des Wechselrichters. In zukünftigen Untersuchungen sollen in Zusammenarbeit mit Modul- und Transistorherstellern genauere Modelle erarbeitet werden. Insbesondere soll dabei auf die Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Halbleitermaterialien (Si, SiC, GaN) eingegangen werden.

Zusätzlich soll auch die Nutzungsphase mehr in das Zentrum rücken. Ein Beispiel hierfür ist die Bewertung unterschiedlicher Technologien zur Verbesserung des Wirkungsgrades hinsichtlich der kompletten Ökobilanz. Eine entscheidende Rolle dabei spielt sicherlich auch die Betrachtung der Lebensdauer des Wechselrichters. Hierfür wird derzeit an sogenannten SLP (Service Life Prediction)-Modellen gearbeitet.

A Literaturverzeichnis

[1] Öko-Institut e.V., „Photovoltaik Wechselrichter - Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen,“ 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oeko.de/oekodoc/1457/2012-038-de.pdf.

[2] „Solar Photovoltaic modules, inverters and systems,“ Joint Research Council, [Online]. Verfügbar unter: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/solar_photovoltaics/index.html. [Zugriff am 20. Februar 2020].

[3] Joint Research Centre, „Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems,“ 10. Juli 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/solar_photovoltaics/docs/20190710_Solar%20PV%20TWG3_Presentation_Final.pdf.

[4] Joint Research Council, „ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment,“ 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf.

[5] Joint Research Council, „ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and action steps,“ 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-PROVISIONS-12March2010-ISBN-a-clean-v1.0-EN.pdf.

[6] L. Tschümperlin, P. Stolz und R. Frischknecht, „Life cycle assessment of low power solar inverters (2.5 to 20 kW),“ treeze Ltd., Fair Life Cycle Thinking, 2016.

[7] A. Nordelöf, M. Alatalo und M. L. Söderman, „A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit - part I and II,“ Chalmers University of Technology, 2017.

[8] T. G. Townsend, „Environmental Issues and Management Strategiesfor Waste Electronic and Electrical Equipment,“ *Journal of the Air & Waste ManagementAssociation,* 10. Oktober 2011.

[9] E. D. Williams, R. U. Ayres und M. Heller, „The 1.7 Kilogram Microchip: Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices,“ *Environmental Science & Technology,* 25. Oktober 2002.

B Zusätzliche Ergebnisse

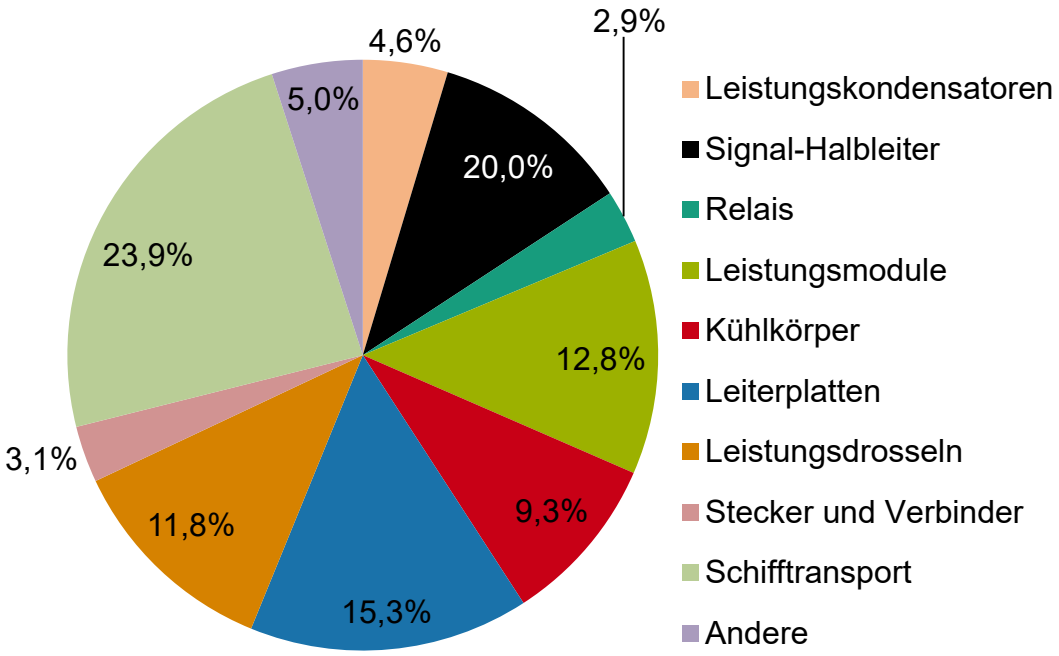

Abb. 10: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Versauerungspotenzial**

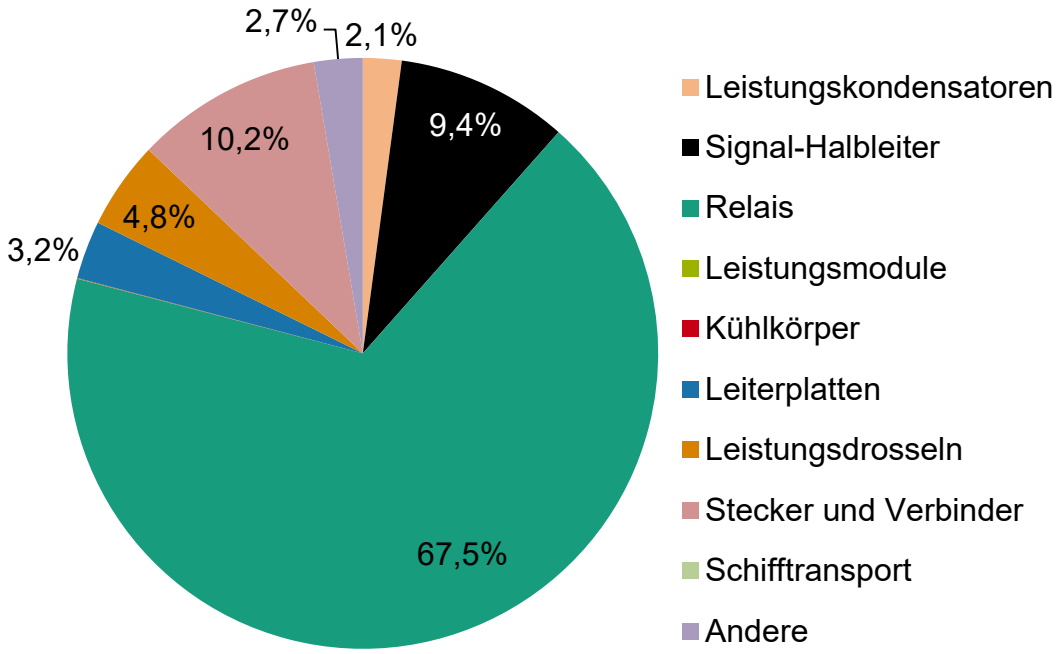

Abb. 11: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Abiotischer Ressourcenverbrauch**

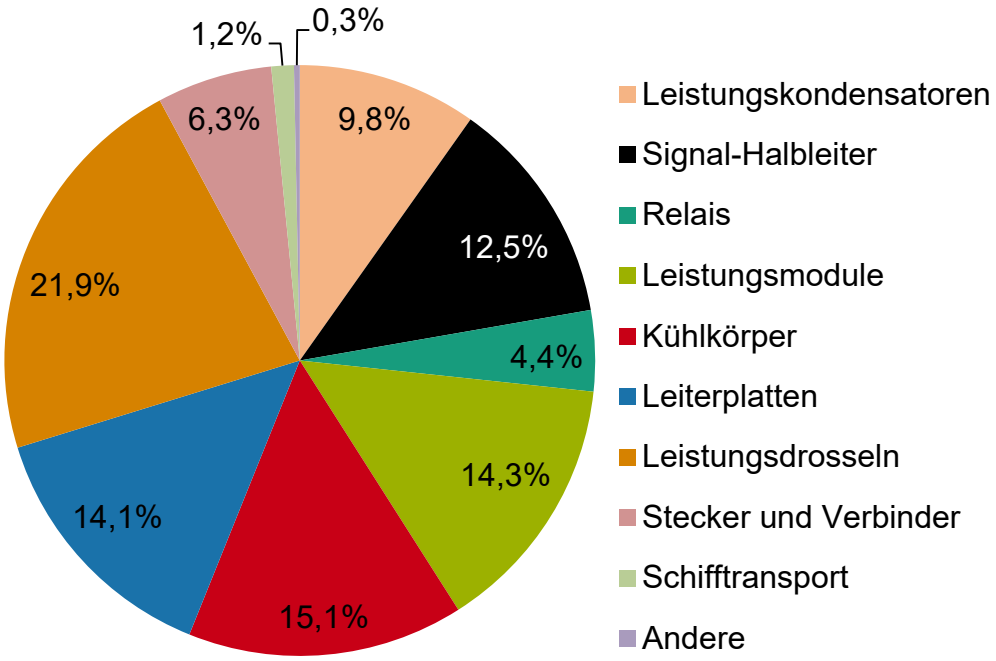

Abb. 12: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Abiotischer Ressourcenverbrauch für fossile Energieträger**

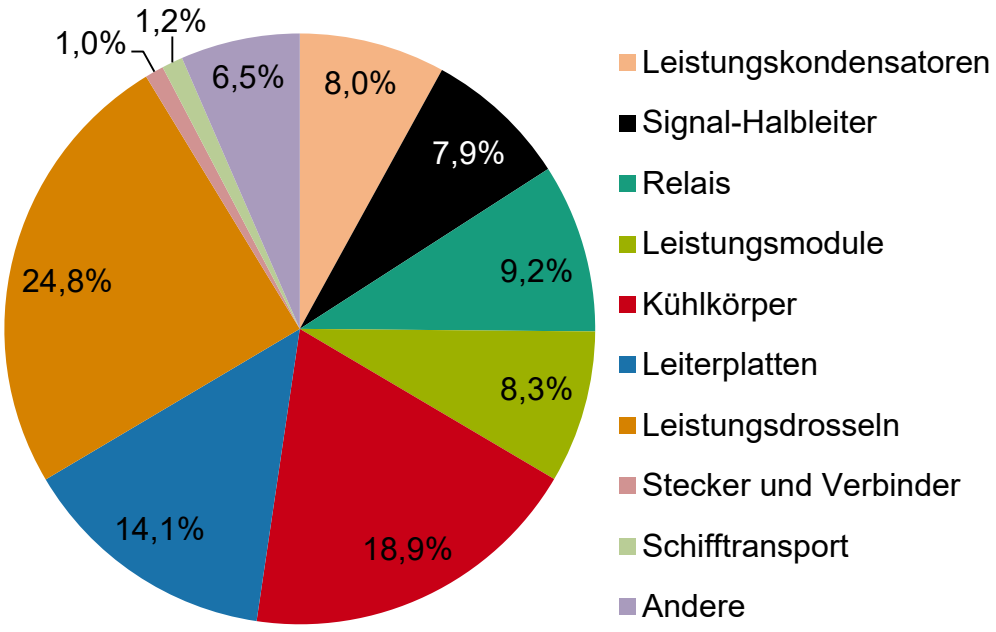

Abb. 13: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Luftverschmutzung**

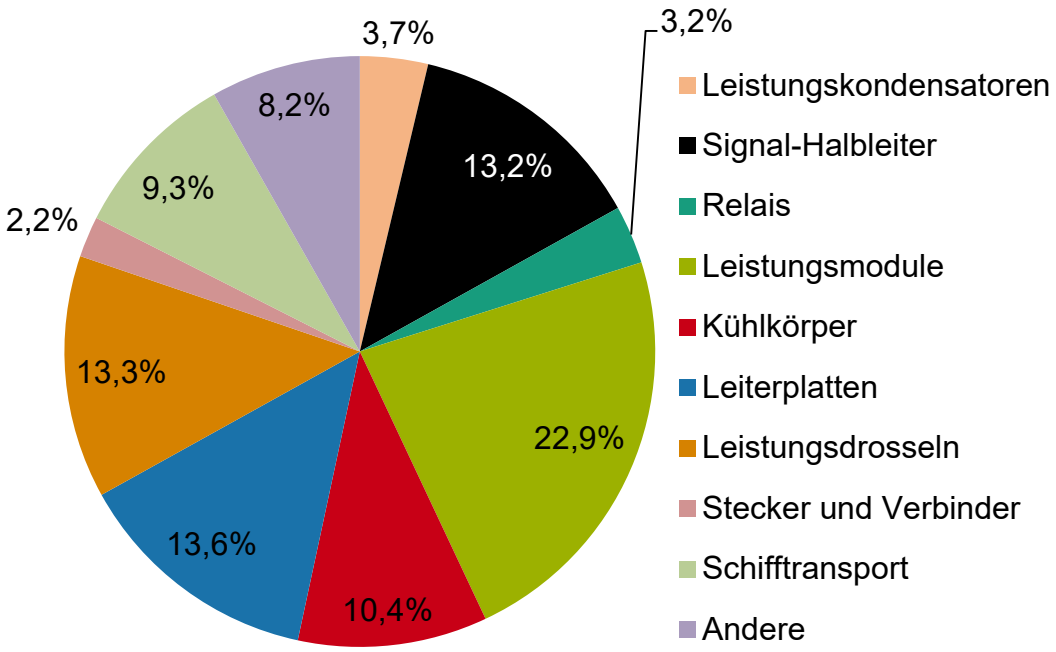

Abb. 14: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Eutrophierung**

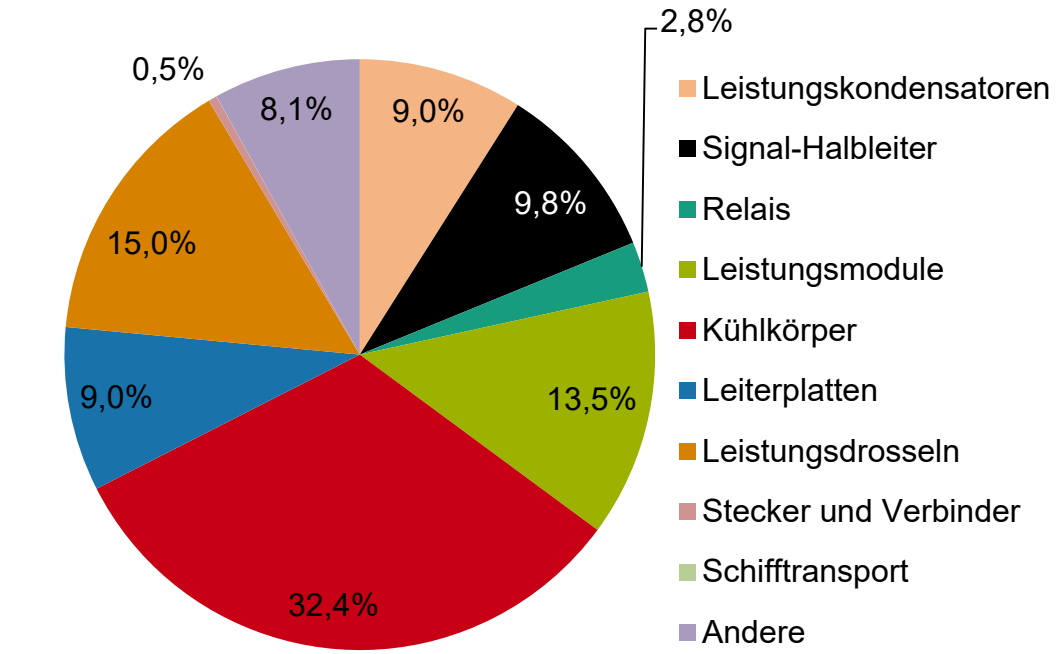

Abb. 15: Auswirkungen der einzelnen Komponentengruppen auf die Wirkkategorie **Ozonabbaupotenzial**