



Fronius Tauro – nachhaltige Technologie für eine grüne Zukunft

Lebenszyklusanalyse (LCA)

DI Mag. Harald Pilz

to4to
together for tomorrow

 **Fraunhofer**
IZM

© Fronius International GmbH

Version 01 05/2022

Business Unit Solar Energy / System Technology

Research & Development Technologies

Fronius behält sich alle Rechte vor, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung.

Die Vervielfältigung dieser Publikation oder von Teilen daraus ist, in welcher Form auch immer, ohne schriftliche Genehmigung von Fronius nicht gestattet. Ebenso ist die Speicherung, Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung mithilfe elektrischer oder elektronischer Systeme untersagt.

Sämtliche Angaben in diesem Dokument erfolgen trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr und können jederzeit geändert werden. Eine Haftung des Autors oder von Fronius ist ausgeschlossen.

Geschlechterspezifische Formulierungen beziehen sich gleichermaßen auf die weibliche und die männliche Form.

Inhalt

1 Einleitung: Der Traum von Nachhaltigkeit	4
1.1 Ziel	5
1.2 Definition einer LCA	5
1.2.1 Was ist eine LCA?	5
1.2.2 Warum ist eine LCA sinnvoll?	6
1.2.3 Die LCA im europäischen Kontext	7
2 LCA: Sammeln relevanter Daten für die Analyse	8
2.1 LCA für den Tauro ECO 100	8
2.2 Rohstoffe	9
2.3 Produktion	10
2.4 Nutzung	10
2.5 End-of-Life	11
3 LCA: Die Umweltleistung des Tauro ECO 100	12
3.1 Der CO ₂ -Fußabdruck des Tauro ECO 100	12
3.2 Nutzen des Tauro ECO 100-D	18
4 Fazit: Noch ein Schritt weiter	20
4.1 Verwendung und Qualität der LCA	20
4.2 Die nächsten Schritte: Auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit	21

1 Einleitung: Der Traum von Nachhaltigkeit

In den letzten Jahrzehnten ist die Erderwärmung zu einer der größten Herausforderungen für die Menschheit geworden. Zu ihren katastrophalen Folgen zählen verheerende Naturkatastrophen, Klimaflucht und Luftverschmutzung. Aber auch andere schwerwiegende Probleme stehen im Zusammenhang mit der Umweltzerstörung: schwindende Biodiversität, Rohstoffkrisen, die Häufung von Gesundheitskrisen usw. Diese Bedrohungen gefährden das soziale Gleichgewicht und die Zukunft der Menschheit. Regelmäßig veröffentlichte Berichte beschäftigen sich mit der Wahrscheinlichkeit dieser Bedrohungen und ihrer Wahrnehmung in der Gesellschaft, so zum Beispiel Analysen des Weltklimarats (IPCC)¹ oder des Weltwirtschaftsforums².

Inzwischen ist es höchste Zeit, diesen Bedrohungen entgegenzuwirken. In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Maßnahmen beschlossen und ehrgeizige Pläne geschmiedet, um den ökologischen Fußabdruck unserer Gesellschaft, von Produkten und Dienstleistungen so weit wie möglich zu reduzieren. Produkte und Dienstleistungen sollten dafür nicht mehr dem linearen Weg „Take - Make - Waste“ folgen, sondern ein zirkuläres Design haben, wie es zum Beispiel im 12. Ziel für nachhaltige Entwicklung (SDG) der Vereinten Nationen verankert ist: „Nachhaltige/r Konsum und Produktion“. Darüber hinaus kann der rein finanzielle Nutzen nicht mehr das einzige Kriterium sein, sondern es sollten auch Nachhaltigkeitsfaktoren berücksichtigt werden.

Wichtige politische Institutionen haben Standards, Gesetze und Strategien eingeführt, die helfen sollen, die verheerenden Folgen des Klimawandels aufzuhalten. Um diese Entwicklung zu begleiten und Verantwortung zu übernehmen, hat Fronius Nachhaltigkeit zu einem seiner obersten Ziele erklärt. Die Vision „24 Stunden Sonne“ von Fronius zeichnet eine Zukunft, in der der weltweite Energiebedarf zu 100 % aus erneuerbaren Quellen gedeckt wird. Um diese Vision Realität werden zu lassen, entwickelt Fronius nachhaltige und optimal ausgelegte Produkte und berücksichtigt dabei sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus. Dafür und um zukunftsfähige Entscheidungen treffen zu können, müssen wissenschaftlich belegbare und auf Fakten basierende Kenntnisse über die Nachhaltigkeitsleistung der Produkte vorliegen. Ein bekanntes und international standardisiertes Instrument zur Analyse der Umwelteinflüsse eines Produkts über seine gesamte Produktlebensdauer ist die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA). Einen bedeutenden Schritt in diese Richtung machte Fronius 2020 mit der ersten Lebenszyklusanalyse für einen seiner Wechselrichter, den Fronius GEN24 Plus. 2022 folgt eine LCA für den Tauro ECO 100 (Ausführungen „D“ und „P“), einen Wechselrichter für Gewerbe und Industrie.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/reports/> (Zugriff am 19.04.2021)

² „The Global Risks Report 2021“: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf (Zugriff am 19.04.2021)

1.1 Ziel

Ziel dieses Whitepapers ist es, das Konzept einer Lebenszyklusanalyse, seine Anwendung auf die Tauro Wechselrichter und die wichtigsten Ergebnisse und Interpretationen vorzustellen. Das Paper soll einen Überblick über die wichtigsten LCA-Ergebnisse geben, ohne zu ausführlich in die Berechnungen und Details einzusteigen.

1.2 Definition einer LCA

In den folgenden Abschnitten wird definiert, was eine LCA ist. Ebenso werden die sich daraus ergebenden Erkenntnisse sowie ihre Relevanz im europäischen Kontext erläutert.

1.2.1 Was ist eine LCA?

Eine Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine wissenschaftliche Methode zur Durchführung von Umweltanalysen, mit deren Entwicklung in den 1990er Jahren begonnen wurde. Hierbei wird die Umweltbelastung des gesamten Inputs und Outputs (Material, Energie, Emissionen, Rohstoffe usw.) eines Produkts (oder einer Dienstleistung) über seine gesamte Lebensdauer hinweg abgebildet und daraus ein umfassendes Bild seiner Umweltleistung erstellt. Den Rahmen der Methode hinsichtlich Struktur, Validität und Konsistenz bilden zwei ISO-Standards (14040 und 14044). Um sicherzustellen, dass der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird, wendeten Fronius und sein LCA-Partner, Harald Pilz von „to4to - together for tomorrow“³, einen „Cradle-to-Grave“-Ansatz („von der Wiege bis zur Bahre“) an und berücksichtigten alle Lebensphasen von der Beschaffung der Rohstoffe über die Produktion und Nutzung bis zum Ende des Produktlebenszyklus (End-of-Life, EOL) einschließlich der Transporte (siehe Darstellung in Abb. 1). Zur weiteren Verbesserung und Sicherstellung der Qualität der Fronius LCA wurde die Analyse in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Fraunhofer IZM⁴ geprüft, einer der weltweit renommiertesten Forschungseinrichtungen im Bereich Nachhaltigkeit von Elektronikprodukten. Das Ergebnis ist eine ganzheitliche, detaillierte und von Fachleuten geprüfte Analyse des ökologischen Fußabdrucks des Produkts.

³ Website: <https://www.to4to.at/>

⁴ Website: <https://www.izm.fraunhofer.de/> (Zugriff am 19.04.2021)

1.2.2 Warum ist eine LCA sinnvoll?

Die LCA-Ergebnisse liefern uns tiefes Wissen und Kenntnisse über die Umweltleistung und die möglichen Grenzen eines Produkts.

Umweltbezogene Produktdaten werden immer wichtiger. Da Fronius die Nachhaltigkeitsleistung seiner aktuellen und künftigen Produkte noch weiter verbessern möchte, muss diese Entwicklung wissenschaftlich belegt, überwacht und verstanden werden. LCAs zählen zu den wenigen standardisierten und konsistenten Methoden zur Abbildung von Umweltbelastungen und sind daher ein äußerst hilfreiches Werkzeug. Anhand dieser evidenzbasierten Analyse kann Fronius das Ziel von „24 Stunden Sonne“ aktiv implementieren und umsetzen. In der Folge können weitere nachhaltige und effiziente Lösungen entwickelt werden – nicht nur zum Nutzen des Kunden, sondern auch der Umwelt.

Um diese Schritte zu beschleunigen, hat Fronius daher das Programm „Sustainability by Design“ ins Leben gerufen. Der erste Schritt im Rahmen dieses Programms war der LCA-Prozess.

Auch in vielen Anforderungen an den PV-Markt lassen sich ein stärkeres Bewusstsein und eine höhere Nachfrage nach evidenzbasierten nachhaltigen Lösungen beobachten:

- Die Europäische Kommission hat Umweltrichtlinien für Produkte auf Basis von Lebenszyklusanalysen (bekannt unter dem Namen „PEFCR“ für „Product Environmental Footprint Category Rule“⁵) entwickelt und fordert, diese voranzutreiben. Darüber hinaus bekämpft die Europäische Kommission Behauptungen zur Nachhaltigkeit, denen es an Beweisen mangelt, und bereitet Verbraucherinnen und Verbraucher auf den Wandel hin zu einer grünen Zukunft vor⁶.
- In aktuellen PV-Ausschreibungen werden Produkte mit kleinem ökologischem Fußabdruck bevorzugt. So hat z. B. 2021 die französische Energieregulierungsbehörde (CRE) eine neue PV-Ausschreibung (700 MW) veröffentlicht, die Module mit geringer Umweltbelastung fordert.⁷
- Immer häufiger kommen Nachhaltigkeitsdatenbanken zum Einsatz, in denen Produkte mit einer umweltfreundlichen Leistung gegenüber anderen stärker beworben werden. Beispiele hierfür sind „Upcyclea“⁸ in Frankreich oder „Byggvarubedomningen“⁹ in Schweden.
- Auch nationale Behörden fordern verstärkt, die Nachhaltigkeit in den Vordergrund zu rücken, so z. B. die Competition and Markets Authority (CMA) im

⁵ Quelle: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEFCR_OEFSR_en.htm#final (Zugriff am 12.04.2021)

⁶ Quelle: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_269 (Zugriff am 08.03.2022)

⁷ Quelle: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/19/france-launches-700-mw-tender-for-large-scale-pv/> (Zugriff am 19.04.2021)

⁸ Quelle: <https://www.upcyclea.com/> (Zugriff am 09.04.2021)

⁹ Quelle: <https://byggvarubedomningen.se/> (Zugriff am 09.04.2021)

Vereinigten Königreich, die Unternehmen auffordert, den gesamten Lebenszyklus eines Produkts zu berücksichtigen, der Reparatur-Index in Frankreich („Indice de réparabilité“) oder das Lieferkettengesetz in Deutschland.

Vor diesem Hintergrund ist eine LCA auf Basis einer soliden wissenschaftlichen Analyse (im Gegensatz zu einer „groben Schätzung“) zusammen mit einer LCA-Validierung ein probates Mittel, um die Ziele von „24 Stunden Sonne“ zu erreichen und Fronius bei verantwortungsvollen Entscheidungen im Entwicklungsprozess zu unterstützen.

1.2.3 Die LCA im europäischen Kontext

Die Strategie von Fronius ist weit mehr als eine einzelne Initiative eines einzelnen Unternehmens. Sie ist vielmehr in einem globalen Kontext zu sehen, in dem die Ökobilanzen von Energiesystemen immer stärker ins Bewusstsein rücken und damit immer mehr im Fokus stehen. Auf europäischer Ebene gibt es bereits mehrere Dokumente mit Leitlinien für Umweltbewertungen, die unter anderem auf dem LCA-Ansatz basieren. Weitere europäische Initiativen unterstreichen die Notwendigkeit, die Zukunft nachhaltig zu gestalten und eine effiziente Energiewende voranzutreiben:

- Der 2019 vorgestellte European Green Deal¹⁰ setzt für Europa das ehrgeizige Ziel, bis 2050 klimaneutral zu sein.
- Vorschriften zum Ökodesign und zu Energielabels¹¹, die die Europäische Kommission bis 2023/2024 umsetzen will: Mit diesen Labels werden Produkte mit einer besseren Umwelleistung gefördert. Geräte, die die Mindestanforderungen nicht erfüllen, dürfen nicht auf dem EU-Markt verkauft werden.
- Auch die aktuelle Gesetzgebung favorisiert die Einführung effizienter und nachhaltiger Energiesysteme. Beispiele dafür sind die Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (REDIII)¹² oder die Verordnung (EU) 2020/852 Taxonomie-Verordnung („Rahmen zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen“)¹³.

¹⁰ Quelle: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (Zugriff am 09.04.2021)

¹¹ Weitere Informationen zum laufenden Verfahren: <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau//product-groups/462/documents> (Zugriff am 09.04.2021)

¹² Quelle: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC (Zugriff am 09.04.2021)

¹³ Quelle: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32020R0852> (Zugriff am 09.04.2021)

2 LCA: Sammeln relevanter Daten für die Analyse

Wesentlicher Bestandteil der Durchführung einer LCA ist zunächst die Sammlung relevanter Daten zum betreffenden Produkt. Im folgenden Abschnitt werden die modellierten Lebenszyklusphasen und die dabei berücksichtigten Erwägungen beschrieben.

2.1 LCA für den Tauro ECO 100

Die Produktfamilie Fronius Tauro soll die Vision „24 Stunden Sonne“ voranbringen und wurde daher auf ihre Umweltleistung und ihren ökologischen Nutzen untersucht.

Dazu wurden auf Basis der ISO-Standards für LCA (ISO 14040/44) vier wesentliche Lebenszyklusphasen modelliert und gründlich analysiert (siehe Abb. 1):

- Die Beschaffung von Rohstoffen
- Die Produktionsphase an Fronius Standorten
- Die Nutzungsphase
- Die End-of-Life-Phase (EOL)

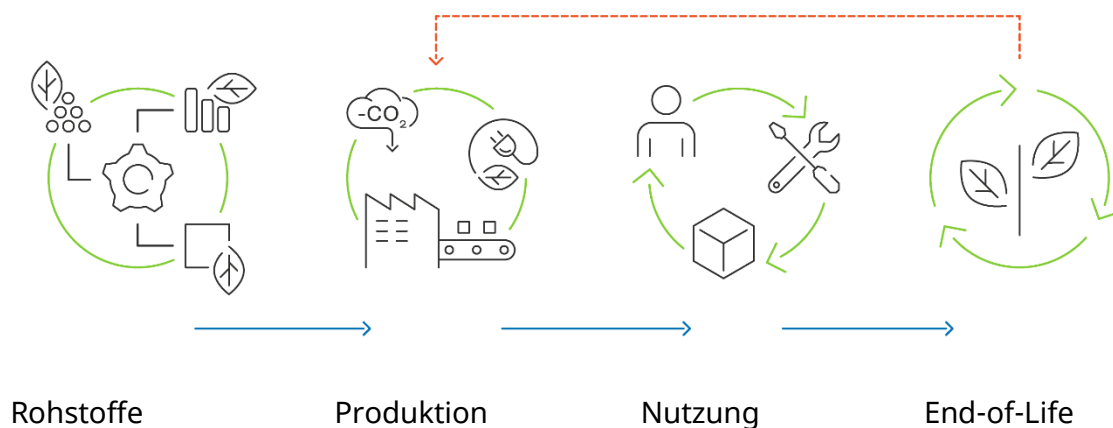


Abb. 1: Der Tauro ECO 100 und seine Lebenszyklusphasen

Die Umweltbelastungskategorien wurden auf Basis der PEF/ILCD-2019/EF-3.0-Richtlinien (EPLCA, 2019¹⁴) berechnet, z. B.:

- Das Global Warming Potential (GWP), das den von dem Produkt über die gesamte Lebensdauer verursachten Treibhauseffekt abbildet (in kg CO₂-Äquivalent). „CO₂-Äquivalent“ ist die Einheit, mit der die Wirkung eines Produkts auf das GWP bewertet wird. „Äquivalent“ bedeutet hier, dass verschiedene Treibhausgase kombiniert und in gleichwertige Effekte von CO₂ auf das GWP „übersetzt“ werden. Beispiel: Die Emission von 1 kg Methan (CH₄) ist äquivalent zu 27,9 kg CO₂ (auf Basis der Methodik des Weltklimarats¹⁵).
- Der kumulierte Energieaufwand (KEA) misst die direkt und indirekt benötigte Energie über den gesamten Lebenszyklus des Produkts (in Megajoule-Äquivalent).

Die Umweltbelastung eines Produkts ist nicht nur auf die CO₂-Emissionen oder den Energieaufwand beschränkt, sondern beinhaltet auch andere Kategorien. Um einen ganzheitlichen und vollständigen Überblick zu erhalten, wurden in der von Fronius durchgeführten LCA auch Faktoren wie z.B. „Metallischer Ressourcenverbrauch“, „Humantoxizität“ und „Feinstaubemissionen“ berücksichtigt. Der Klarheit halber wird der Fokus in den folgenden Abschnitten dieses Papers aber auf den beiden gängigsten und wichtigsten Wirkungskategorien liegen: dem Treibhausgaspotenzial und dem kumulativen Energieaufwand.

Für Hintergrundprozesse (Sekundärdaten) der LCA wurde die Datenbank ecoinvent (Version 3.8 2021¹⁶) herangezogen, eine der weltweit umfassendsten und bekanntesten LCI-Datenbanken (Life Cycle Inventory).

2.2 Rohstoffe



In der Beschaffungsphase werden zunächst alle relevanten Prozesse von der Rohstoffgewinnung und -veredelung bis zur Produktion von Komponenten berücksichtigt. In dieser Phase wurden intensive Gespräche und Recherchen mit Lieferanten durchgeführt, um möglichst viele Primärdaten zu erhalten. Die Materialzusammensetzung der verschiedenen an Fronius gelieferten Bauteile wurde analysiert und mit Primärdaten oder ggf. mit der ecoinvent-Datenbank modelliert. Zusätzlich wurden auch intensive Analysen zur Zusammensetzung dieser Bauteile durchgeführt, um möglichst detaillierte Ergebnisse zu erhalten. Die Analysen wurden insbesondere für Halbleiter und die Verwendung von Gold in Elektronikkomponenten durchgeführt. Zu

¹⁴ Quelle: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml> (Zugriff am 03.01.2022)

¹⁵ Quelle: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (Tabelle 7.SM.7, S. 1842, Zugriff am 15.03.2022)

¹⁶ Quelle: <https://www.ecoinvent.org/> (Zugriff am 16.02.2022)

diesem Zweck wurden DC-Trennschalter, Sicherungen, Lüfter und andere Teile zerlegt (siehe Bild 1).



Bild 1: Kleinteilige Zerlegung eines DC-Trennschalters des Tauro ECO zur weiteren LCA-Modellierung

2.3 Produktion



In der Produktionsphase wird die Produktion des Tauro ECO 100 an den Produktionsstandorten von Fronius betrachtet. Die Modellierung der Produktion des Tauro ECO 100 in Fronius Werken erfolgte vorwiegend auf der Basis von Primärdaten. Dabei wurden beispielsweise folgende Aspekte berücksichtigt: Stromaufnahme an der Fertigungsstraße, Bedarf an Lötpaste, potenzielle Abfallproduktion und Abfallmanagement sowie Einsatz von Verpackung. Bei Bedarf wurden zur Vervollständigung der Modellierung mehrere Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank extrahiert. Insgesamt wurden für die folgenden Gerätetypen LCA-Modelle entwickelt:

- Tauro ECO 100 – Variante D („Direct“) für eine dezentrale Auslegung der PV-Anlage
- Tauro ECO 100 – Variante P („Precombined“) für eine zentrale Auslegung der PV-Anlage

2.4 Nutzung



Für die Nutzungsphase ist die Zeit relevant, in der der Tauro ECO in einer PV-Anlage aktiv ist und möglicherweise repariert wird. Deshalb werden mehrere Faktoren berücksichtigt, wie zum Beispiel:

- Die Lebensdauer des Wechselrichters, festgelegt auf einen Standardwert von 20 Jahren.
- Die Länder, in denen die Anlage genutzt wird. Dieser Parameter wirkt sich auf die Stromerzeugungskapazität der PV-Anlage und den Transportweg für das Produkt

aus. Für die LCA des Tauro ECO wurden folgende sieben Länder berücksichtigt: Australien, Österreich, Brasilien, Deutschland, Polen, Spanien und Italien.

- Die Wechselrichterverluste: Dieser Wert wird auf Basis der Modellierung von PVSol für jedes Szenario ermittelt, um eine möglichst realitätsnahe Modellierung (für 2022) zu erzielen.¹⁷ Die Software PVSol liefert im Gegensatz zu anderen standardisierten EU-Bezugswerten je nach Land und Parametern realistischere Ergebnisse. Außerdem kann auch die Überdimensionierung der PV-Anlage modelliert werden (siehe Abschnitt 3.1).
- Den Nacht- oder Standby-Verbrauch für die Datenerfassung oder den Zugriff auf die Benutzerschnittstelle (15 W).
- Reparaturprozesse wurden ebenfalls mit den folgenden Szenarien modelliert:
 - Austausch des Leistungsteils
 - Austausch des externen Lüfters des Leistungsteils
 - Austausch der Datenkommunikationseinheit
 - Austausch der Steuerplatine

Alle genannten Teile können vom Monteur direkt vor Ort ausgetauscht werden. Das defekte Bauteil wird dann entweder der Abfallbehandlung zugeführt oder zur Instandsetzung an den jeweiligen Standort von Fronius gesendet.

2.5 End-of-Life



In der letzten Phase (End-of-Life, EOL) wird berücksichtigt, in welcher Form das Produkt weiterverwendet oder recycelt werden kann. Zur Modellierung der möglichen EOL-Behandlung wurden fünf Hauptszenarien erstellt:

- Deponierung
- Abfallverbrennung
- Metallrecycling mit nachgelagerter Müllverbrennung
- Recycling ohne vorausgehende Demontage (der Hauptbauteile des Tauro ECO 100¹⁸)
- Recycling mit vorausgehender Demontage (der Hauptbauteile des Tauro ECO 100)

Abhängig von der gewählten Option sind Belastung und Nutzen für die Umwelt unterschiedlich. So verursacht beispielsweise die Deponierung größere Umweltbelastungen als das Recycling mit Demontage (siehe Abschnitt 3.1).

¹⁷ Quelle: <https://valentin-software.com/produkte/pvsol-premium/> (Zugriff am 16.02.2022)

¹⁸ Die Hauptbauteile sind: fünf Aluminiumbauteile (Kühlkörper und vier Bleche), drei verzinkte Bleche, drei Kabelbäume, fünf Leistungsteile, eine Datenkommunikationseinheit, eine Steuerplatine

3 LCA: Die Umweltleistung des Tauro ECO 100

Nachdem alle relevanten Daten gesammelt sind, werden die Umweltleistung und die LCA-Ergebnisse des Tauro ECO 100 ermittelt. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben. Insbesondere wird auf den CO₂-Fußabdruck und die Vorteile des Tauro ECO 100 eingegangen.

3.1 Der CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100

Naturgemäß kann ein Wechselrichter im Gegensatz beispielsweise zu einem Baum kein CO₂ (oder andere Schadstoffe) aus der Atmosphäre aufnehmen. Durch einen an eine PV-Anlage angeschlossenen Wechselrichter werden aber weit weniger CO₂-Emissionen freigesetzt als bei der hier betrachteten Alternative (Strom aus dem Netz). Über diesen Vergleich (PV-Anlage vs. Strom aus dem Netz) können wir die Verringerung der CO₂-Emissionen durch Solarenergie bewerten. Im vorliegenden Whitepaper wird anhand eines bestimmten Szenarios konkret gezeigt, welche Erkenntnisse aus einem LCA-Modell gezogen werden können.¹⁹

Tabelle 1: Mögliche Szenarien (die im Whitepaper berücksichtigten Optionen sind fett markiert)

1. Fronius Wechselrichter	2. Einsatzort	3. End-of-Life-Strategie	4. Ergänzende Parameter
<ul style="list-style-type: none"> – Tauro 100-P – Tauro 100-D 	<ul style="list-style-type: none"> – Österreich – Deutschland – Polen – Brasilien – Australien – Spanien – Italien 	<ul style="list-style-type: none"> – Deponierung – Abfallverbrennung – Metallrecycling mit nachgelagerter Müllverbrennung – Recycling ohne Demontage – Recycling mit Demontage 	<ul style="list-style-type: none"> – Erwartete Lebensdauer: 20 Jahre – Durchschnittlicher Reparaturverlauf Strommix für Nachtverbrauch

Darüber hinaus werden PV-Anlagen für Gewerbe und Industrie in der Regel im Verhältnis von PV-Modulkapazität zu Leistungsbereich des PV-Wechselrichters „überdimensioniert“. Im vorliegenden Szenario wurde basierend auf Erfahrungswerten

¹⁹ Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl von Einzelergebnissen konnte das Fraunhofer IZM nicht alle möglichen Szenarien und spezifischen Werte prüfen (es sind mehrere Tausend detaillierte Varianten möglich). Geprüft wurden aber die allgemeine Struktur und Modellierung der LCA. Da alle Szenarien derselben Methodik folgen, ist größtmögliche Konsistenz gegeben.

von Fronius eine normale Überdimensionierungsrate von 130 % gewählt, d. h. ein Tauro ECO 100 kW wird an eine 130-kWp-PV-Anlage angeschlossen.

Die PV-Anlagen-Perspektive

Zunächst gilt es, sich bei einer LCA der Grenzen der Ergebnisse bewusst zu sein: Ein Wechselrichter ist nur ein Teil einer PV-Anlage. In der folgenden Übersicht auf PV-Anlagen-Ebene wird daher gezeigt, welchen relativen Beitrag die einzelnen Teile einer PV-Anlage (Module, Wechselrichter usw.) jeweils haben. Die Daten zum CO₂-Fußabdruck der PV-Module wurden der LCI-Datenbank ecoinvent entnommen und mit den Recherchen durch Fronius in einschlägiger Literatur kombiniert. Abb. 2 gibt einen Überblick auf Anlagenebene, wobei nicht vergessen werden darf, dass sich die Anteile je nach Daten oder Szenarien geringfügig (um wenige Prozent) ändern können. Die Systembilanz (Balance of Systems, „BoS“) in Abb. 2 berücksichtigt weitere Bauteile, die für eine PV-Anlage benötigt werden (unterstützende Infrastruktur, Verdrahtung, Kabel usw.).

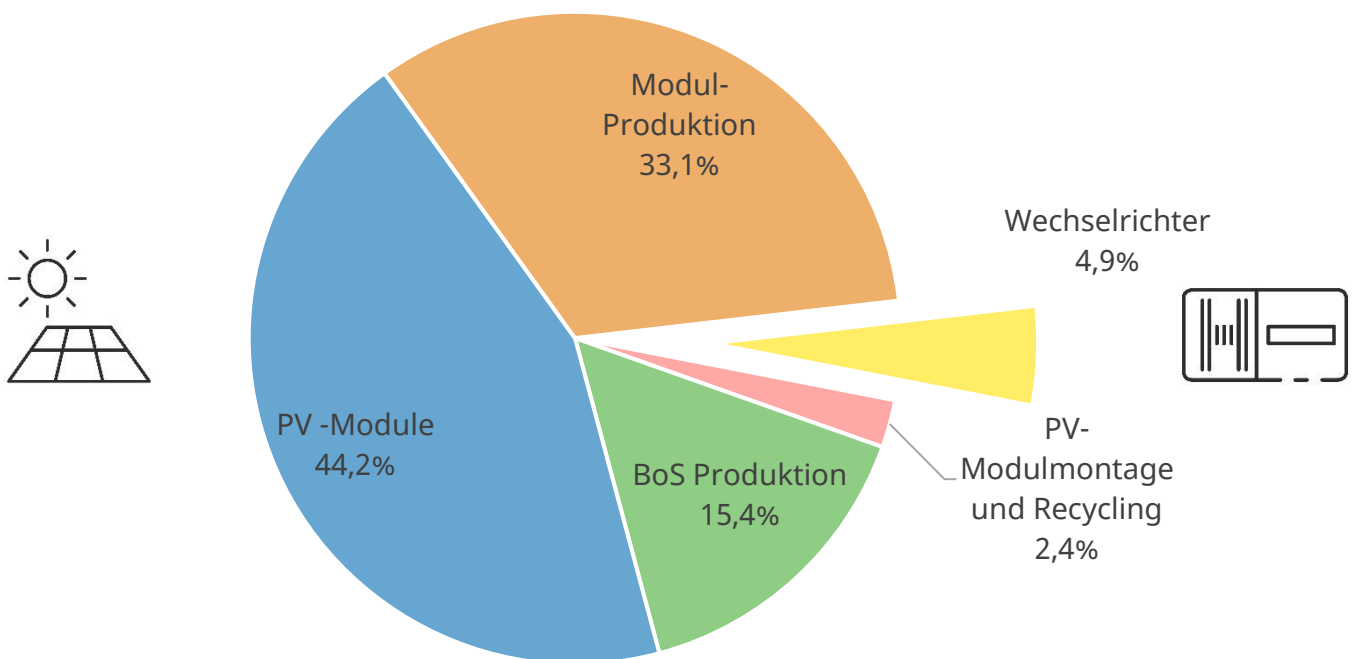


Abb. 2: Relativer Beitrag des PV-Wechselrichters (Szenario für Australien) zum CO₂-Fußabdruck der PV-Anlage (auf PV-Anlagenebene)

Im ausgewählten Szenario ist der Wechselrichter für 4,9 % der Umweltbelastung der gesamten PV-Anlage verantwortlich. (Dieser Wert kann szenarioabhängig zwischen 3,5 und 5,3 % variieren.) Das bedeutet, dass 4,9 % des Umweltnutzens der gesamten PV-Anlage dem Wechselrichter zugerechnet werden können.

Der CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100-D nach Lebenszyklusphasen

In den folgenden Diagrammen liegt der Fokus auf dem Wechselrichter, für den primäre und zuverlässige Daten gesammelt werden konnten und sehr detaillierte Analysen durchgeführt wurden. Das folgende Diagramm zeigt den CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters allein (der aber an eine PV-Anlage angeschlossen ist) als absolute Werte in kg CO₂-Äquivalent (kg CO₂e).

CO₂-Fußabdruck (kg CO₂e)

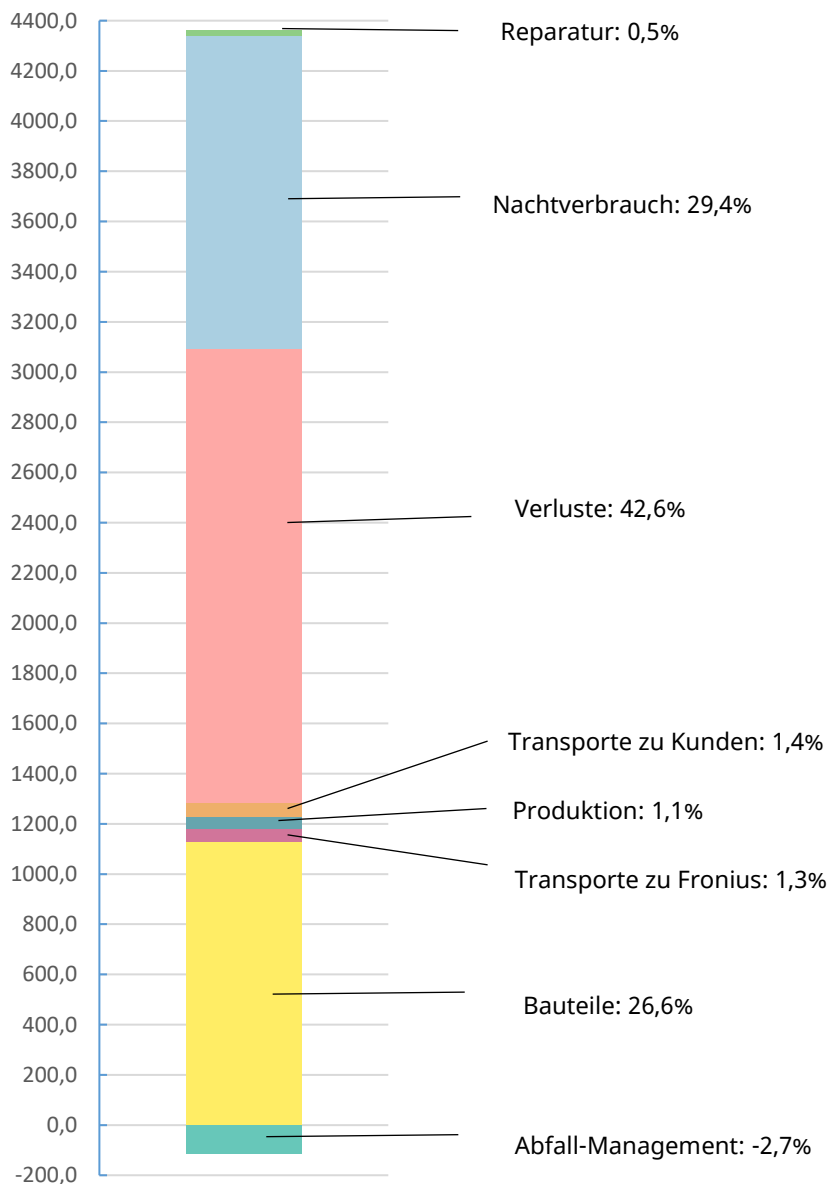


Abb. 3: CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100-D in absoluten Werten und als relative Beiträge nach Lebenszyklusphasen. Die Abbildung zeigt deutlich, welchen Anteil die Beschaffungs- und die Nutzungsphase am CO₂-Fußabdruck haben.

Wie in Abb. 3 dargestellt, beläuft sich der gesamte CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100-D auf **4.247,8 kg CO₂e** (4.362,7 kg CO₂e bei einer Umwelt-„Gutschrift“ von -114,9 kg CO₂e aus dem Abfallmanagement). Darüber hinaus lassen sich daraus weitere wichtige Informationen und Erkenntnisse ableiten:

- Fertigungsphase der Bauteile: Die für die Bauteile (Metalle, elektronische Bauteile, Kunststoffe usw.) erforderlichen Fertigungsprozesse haben einen erheblichen Anteil (mehr als ein Viertel) am gesamten CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters. Dieses Ergebnis macht den großen Einfluss der Lieferkette deutlich und zeigt, wie wichtig es ist, gemeinsam mit allen Beteiligten entlang der Lieferkette Anstrengungen zu unternehmen, um die Umweltleistung von Wechselrichtern in Zukunft weiter zu verbessern. Fronius hat in dieser Hinsicht bereits entsprechende Maßnahmen ergriffen. So besteht zum Beispiel der Kühlkörper zu 70 % aus recyceltem Aluminium.
- Produktionsphase: Die Montage des Wechselrichters am Fronius Produktionsstandort hat nur einen geringen Anteil am CO₂-Fußabdruck (in diesem Szenario 1,1 %). Das beweist, dass der Montageprozess bereits optimiert ist. Außerdem stammt die am Produktionsstandort verwendete Energie aus erneuerbaren Energiequellen (Ökostromvertrag und lokale PV-Anlage). Mit den PV-Anlagen an den Produktionsstandorten produziert Fronius fast 2.000 MWh Solarenergie pro Jahr. Das ist unter anderem auch der Grund für den geringen Fußabdruck in der Produktionsphase.
- Transport von Bauteilen zu Fronius und der Fronius Wechselrichter zu Kunden: Auch diese Schritte haben einen geringen Anteil am CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters. Der Hauptgrund dafür ist, dass Fronius Luftfracht so weit wie möglich vermeidet und Züge, Lkws oder Seefracht bevorzugt, wodurch ein relativ kleiner CO₂-Fußabdruck erzeugt wird (insgesamt weniger als 3 %).
- Verluste: Jedes Produkt hat seinen eigenen CO₂-Fußabdruck (vergleichbar mit einem „CO₂-Rucksack“ oder einer „CO₂-Schuld“), der sich aus den dahinter liegenden Fertigungsprozessen, dem Transport usw. zusammensetzt. Folglich hat auch Strom aus einer PV-Anlage einen CO₂-Rucksack (mit einem Wert von ca. 15 bis 80 g CO₂e/kWh), der kleiner ist als der CO₂-Rucksack des Stroms aus dem Netz (je nach Land im Bereich von ca. 100 bis 1200 g CO₂e/kWh). Der Tauro ECO 100 wird mit dem von der Software PVSol angegebenen Verlustwert modelliert. Dabei werden die Sonneneinstrahlungswerte im betreffenden Land und die Überdimensionierung der PV-Anlage berücksichtigt. Im Szenario für Australien ist der Wechselrichterverlustwert auf 2,19 % angesetzt. Das bedeutet, dass ein bestimmter Betrag der Elektrizität aus den PV-Modulen mit ihrem CO₂-Rucksack in Form von Wärme verloren geht. 2,19 % ist ein relativ niedriger Wert (der Bereich liegt je nach Szenario bei 2,12 bis 2,48 %), allerdings wird der Wechselrichter 20 Jahre lang genutzt. Die Verluste müssen deshalb für die gesamte Lebensdauer hinzugerechnet werden. Selbst bei dem hohen Wirkungsgrad des Tauro ECO 100 (97,81 %, basierend auf der PVSol-Modellierung) führt dieser Effekt dazu, dass die

Verluste (aus der Nutzungsphase) den größten Beitrag zum Gesamtergebnis des CO₂-Fußabdrucks leisten.

- **Nachtverbrauch:** In diesem Szenario wird angenommen, dass die PV-Anlage an das australische Stromnetz angeschlossen ist und der PV-Wechselrichter im Jahresdurchschnitt 12,10 Std./Tag im „Nachtmodus“ läuft. Der relativ hohe CO₂-Fußabdruck des australischen Netzstroms führt zu einem bedeutenden CO₂-Fußabdruck für den Nachtverbrauch (mit 1.249,5 kg CO₂e ist dieser größer als der CO₂-Fußabdruck aller Bauteile und der Produktion des Tauro und entspricht 29,4 % des gesamten CO₂-Fußabdrucks des Wechselrichters). Wenn allerdings der Strom für den Nachtverbrauch von einem Anbieter erneuerbarer Energien bezogen wird, ist der entsprechende CO₂-Fußabdruck des Nachtverbrauchs sehr viel kleiner (in einer Größenordnung von ca. 56 kg CO₂e, was einem Anteil von ca. 1,8 % entspricht). Es gilt deshalb, den durch den Nachtverbrauch verursachten CO₂-Fußabdruck des PV-Wechselrichters so stark wie möglich zu verringern. Das kann beispielsweise durch die Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Quellen geschehen.
- **Reparatur:** Es wurden verschiedene Reparatur Szenarien modelliert (siehe Abschnitt 2.4), wobei hier ein durchschnittlicher Wert für Reparaturmöglichkeiten berücksichtigt wird. Die positive Umweltwirkung eines Reparaturprozesses, wenn auch vernachlässigbar (in diesem Szenario 0,5 %), wird vor allem durch den Transport und die Produktion des auszutauschenden Bauteils bestimmt. Abhängig von der Art der erforderlichen Reparatur bewegt sich dieser zusätzliche CO₂-Fußabdruck im Bereich zwischen 5,91 und 167,7 kg CO₂e. Dennoch wird durch die Reparatur der schlimmste anzunehmende Fall vermieden: dass der komplette Wechselrichter ausgetauscht werden muss. Dadurch würde sich der CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters durch die Produktionsphase, den Transport und andere Faktoren massiv erhöhen. Eine Reparatur hingegen wirkt sich auch nach 17 Nutzungsjahren (die Standardlebensdauer eines Wechselrichters liegt bei 20 Jahren) noch positiv auf den CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters aus. Konkret bedeutet das, dass wenn beispielsweise die Datenkommunikationseinheit nach 10 Jahren ausgetauscht werden muss, sich der auf den Reparaturprozess anzurechnende CO₂-Fußabdruck auf 26,4 kg CO₂e beläuft. Für die Alternative, also den gesamten Wechselrichter auszutauschen, fielen ein zusätzlicher CO₂-Fußabdruck von 1.189,9 kg CO₂e (für Bauteile, Produktion, Transporte und Abfallverwertung) an, eine um das 45-Fache höhere Belastung. Das bedeutet, dass die Reparatur einen bedeutenden Nutzen für die Umwelt bringt.
- **Abfallmanagement:** Fronius hält sich an die WEEE-Richtlinie und ist bestrebt, die Wiederverwertbarkeit seiner Produkte zu erhöhen. Daher kann durch die Substitution und die Vermeidung von neuem Rohstoffabbau sowie durch einen reduzierten Energiebedarf eine Umweltgutschrift (negativer Wert im Balkendiagramm von Abb. 3) erzielt werden. Der verantwortungsvolle und bewusste Umgang mit den Ressourcen der Erde ist eine Kernverpflichtung für Fronius und steigert den Umweltnutzen.

Vergleich zwischen Gewicht und CO₂-Fußabdruck

Aus den Ergebnissen der LCA lässt sich auch der relative Beitrag der einzelnen Bauteile auf den CO₂-Fußabdruck des Wechselrichters Tauro ECO 100-D selbst ablesen, wie die folgenden Abbildungen zeigen:

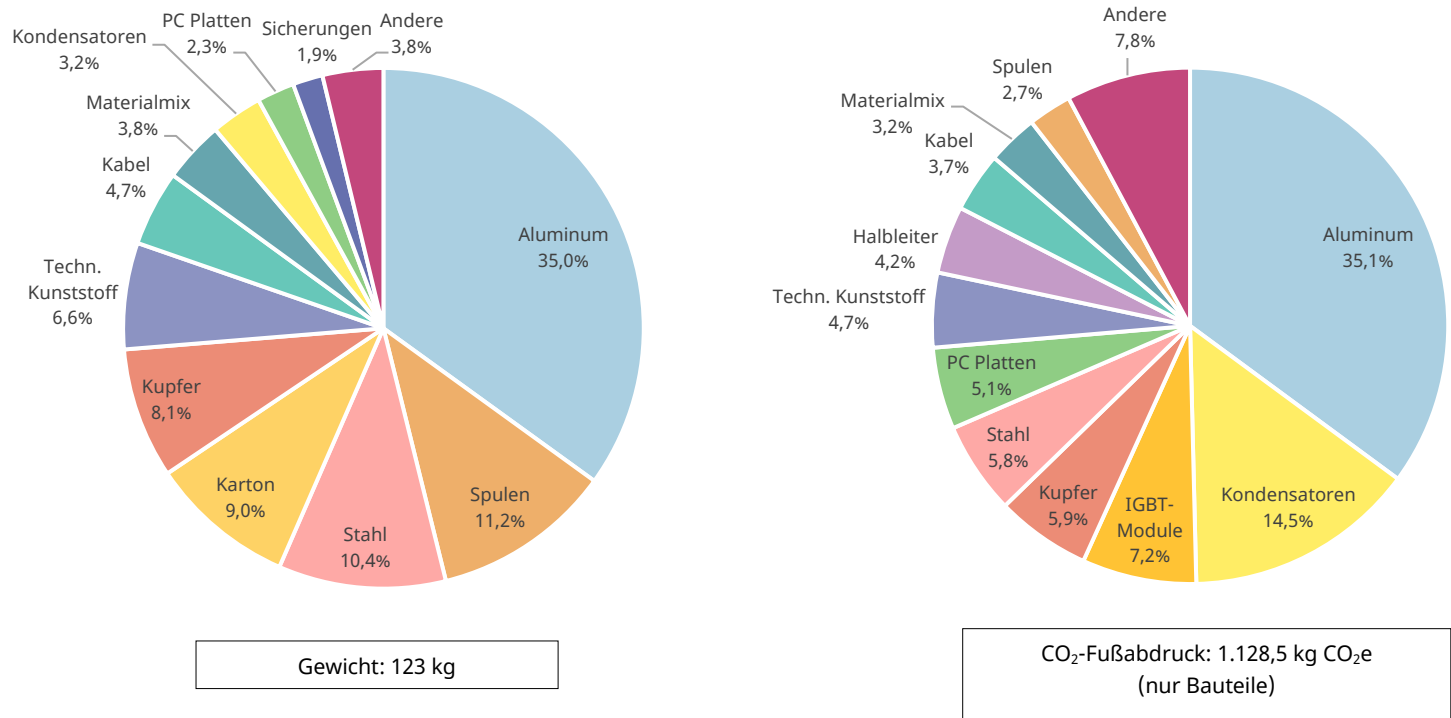


Abb. 4: **Relativer Beitrag der einzelnen Bauteile des Tauro ECO 100-D nach Gewicht (links, in % kg) und nach CO₂-Fußabdruck (rechts, in % kg CO₂e).** Die Abbildungen zeigen, dass Teile mit einem verhältnismäßig geringen Gewicht einen bedeutenden Anteil am CO₂-Fußabdruck haben können.

Wie in Abb. 4 zu sehen ist, macht das Aluminium den größten Anteil am Gewicht und am CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100-D aus. Interessant ist das Verhältnis bei den Kondensatoren. Sie machen lediglich 3,2 % des Gewichts aus, sind aber für 14,5 % des CO₂-Fußabdrucks verantwortlich (bei IGBT-Modulen ist das Verhältnis noch extremer: 0,2 % des Gewichts, aber 7,2 % des CO₂-Fußabdrucks). Dieses LCA-Ergebnis zeigt, dass Bauteile mit einem geringen Gewicht aufgrund der energieintensiven Prozesse in den Upstream-Phasen (Fertigung, Veredelung usw.) eine bedeutende Umweltbelastung darstellen können. Spulen hingegen haben im Verhältnis zu ihrem Gewicht (11,2 %) einen kleinen CO₂-Fußabdruck (2,7 %).

End-of-Life-Management

In Bezug auf das Abfallmanagement zeigen die LCA-Ergebnisse ebenfalls, dass der Umweltnutzen umso größer ist, je umfangreicher der End-of-Life-Managementprozess ist (siehe Abb. 5). Die negativen Werte stellen die Gutschrift für die Substitution von Primärmaterialien oder von fossilen Energieträgern dar.



Abb. 5: **Umweltkosten bzw. -nutzen von End-of-Life-Prozessen des Tauro ECO 100-D.** Bei Deponierung kommt es zu weiteren Emissionen. Der Umweltnutzen steigt mit dem Recycling von Metall und wird optimal in Verbindung mit der Demontage der Hauptbauteile des Tauro.

3.2 Nutzen des Tauro ECO 100-D

Nach diesem Überblick über den CO₂-Fußabdruck des Tauro ECO 100-D werden im Folgenden die Vorteile des Geräts beschrieben.

Die Nutzung von Strom aus einer PV-Anlage mit einem Tauro ECO 100-D in Australien würde einen durchschnittlichen CO₂-Fußabdruck von **18,1 g CO₂e/kWh** erzeugen. Im Vergleich dazu würde die Nutzung des Stroms aus dem **australischen Stromnetz** einen CO₂-Fußabdruck zwischen **600 bis 950 g CO₂e/kWh** hinterlassen (ca. 33- bis 56-mal höher, nicht nur, aber vor allem aufgrund der Nutzung von Kohle)²⁰.

²⁰ Durchschnitt auf Basis von: <https://www.electricitymap.org/map>, ecoinvent, <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/National%20greenhouse%20and%20energy%20reporting>

Zum Vergleich: Grob geschätzt entsprechen die durch die gesamte PV-Anlage (nicht nur den Wechselrichter) während der Laufzeit von 20 Jahren eingesparten CO₂-Emissionen in etwa 10.323 neu gepflanzten Bäumen²¹. Ein weiterer grober Vergleich kann anhand von Autos mit Verbrennungsmotor angestellt werden, wobei ein durchschnittlicher Verbrauch von 5 l/100 km angenommen wird. Basierend auf der ecoinvent-Datenbank entspräche der Umweltnutzen einer PV-Anlage mit dem Tauro ECO 100-D in Australien während der Laufzeit von 20 Jahren (Nutzen der gesamten PV-Anlage, nicht nur der dem Wechselrichter zugeschriebene) der Einsparung der CO₂-Emissionen von ca. **30.791.513 km** gefahrenen Autokilometern. Im gleichen PV-Anlagen-Nutzungsszenario beliefe sich die Einsparung von CO₂-Emissionen auf ca. **2.018 Hin- und Rückflüge von Wien nach New York**²².

Nach den LCA-Ergebnissen liegt die **CO₂-Amortisationszeit** (Zeit, bis die vermiedenen CO₂-Emissionen die CO₂-Emissionen des Produkts ausgleichen) je nach Szenario im Bereich von **0,4 bis 1,9 Jahren**. Beim vorgestellten Szenario in Australien liegt der Wert bei 0,4 Jahren. Nach dieser Amortisationszeit **spart der Betreiber des Tauro ECO 100 im Vergleich zur Alternative mit Strom aus dem Netz CO₂-Emissionen ein** und erzeugt so eine positive Umweltwirkung. Wenn ein Tauro ECO 100 Wechselrichter 20 Jahre lang genutzt wird, kann die Gesamtmenge der **vermiedenen CO₂e-Emissionen** bis zu **52,9-mal höher** sein als die im ganzen Lebenszyklus des Geräts verursachten CO₂-Emissionen.

Die **energetische Amortisationszeit** liegt im Bereich von **0,3 bis 0,8 Jahren** (im vorliegenden Szenario bei 0,3 Jahren). Beim Erreichen dieser Amortisationszeit hat die PV-Anlage die Menge an Energie produziert, die für ihre eigene Lebensdauer aufgewendet wurde (Energie für Fertigung, Transport usw.). Ab diesem Zeitpunkt produziert die PV-Anlage „Extra-Energie“, die **dem Ökosystem einen energetischen Mehrwert bringt**.

Wenn ein Tauro ECO 100 Wechselrichter 20 Jahre lang genutzt wird, kann die gesamte **erzeugte Energie** bis zu **62,7-mal höher** sein als die im ganzen Lebenszyklus des Geräts aufgewendete Energie.

[%20data/electricity-sector-emissions-and-generation-data/electricity-sector-emissions-and-generation-data-2020-21](#)

²¹ Auf der Grundlage des folgenden Dokuments: Nam et al. 2016: „Allometric Equations for Aboveground and Belowground Biomass Estimations in an Evergreen Forest in Vietnam“

(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4910975/>)

²² Berechnungen von Flugemissionen basieren auf: https://co2.myclimate.org/en/flight_calculators/new. Die Werte für Bäume, Autokilometer und Flüge dienen hier lediglich zu Vergleichszwecken; es handelt sich dabei nicht um standardisierte oder validierte Zahlen (abhängig von der verwendeten Quelle).

4 Fazit: Noch ein Schritt weiter

Im folgenden Kapitel wird nach erfolgreicher Durchführung der LCA über die weitere Verwendung der LCA sowie weitere Schritte auf dem Fronius Nachhaltigkeitspfad informiert.

4.1 Verwendung und Qualität der LCA

Nach der bereits durchgeführten LCA für den GEN24 Plus im Jahr 2020 stellt die LCA für den Tauro ECO 100 einen bedeutenden weiteren Schritt für die Fronius Aktivitäten im Bereich Nachhaltigkeit dar²³. Die daraus gewonnenen klaren und auf wissenschaftlichen Fakten beruhenden Kenntnisse können als Basis für die Entwicklung weiterer Produkte mit einem noch höheren Umweltnutzen genutzt werden. Darüber hinaus belegen die LCA-Ergebnisse die beeindruckende Umwelleistung des Fronius Tauro ECO 100 und sie können als Nachweise bei Anfragen zu Nachhaltigkeitsanforderungen (Auflagen, Ausschreibungen usw.) herangezogen werden.

LCAs werden in den kommenden Jahren mehr und mehr Verbreitung finden und es wird sicherlich auch Versuche geben, LCA-Ergebnisse verschiedener Unternehmen miteinander zu vergleichen. Dabei sollte jedoch vorsichtig und kritisch vorgegangen werden. Vergleiche zwischen LCAs können sehr schwierig sein, denn der Umfang des zu analysierenden Systems und die angewandte Methodik oder auch die verwendeten Datenquellen können erheblich voneinander abweichen. Es gibt noch kein einheitliches, international anerkanntes LCA-Rahmenwerk (vor allem was die angewandte Methodik betrifft), was zu potenziell unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. In dieser Hinsicht besteht Bedarf an klarer Transparenz und Kommunikation über die LCA-Modellierung, die Systemdefinitionen und die angewandte Methodik. Trotz der aktuellen Schwierigkeiten in der Welt der LCA-Methodik hat Fronius sein Bestes gegeben, um aussagekräftige und valide Ergebnisse zu erzielen. Die LCA wurde in Zusammenarbeit mit Harald Pilz (to4to) erstellt. Er ist Experte auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitsbeurteilung und hat weitreichende Erfahrungen mit LCAs. Der LCA-Review gemäß ISO 14040/44, der mit dem Fraunhofer IZM als unabhängiger externer Instanz durchgeführt wurde, ist ein weiterer konkreter Schritt im Rahmen dieser Strategie. Ziel des LCA-Reviews war es, die Qualität und Konsistenz der durchgeführten LCA-Schritte zu prüfen, zu bestätigen und zu unterstützen. Das Fraunhofer IZM ist eine etablierte Forschungseinrichtung, deren Sachkunde und Expertise in den Bereichen Elektronik und PV-Anlagen sowie LCAs und Validierungsprozesse international anerkannt sind²⁴. Im

²³ LCA Gen 24 Plus Whitepaper:

https://www.fronius.com/~/-/downloads/Solar%20Energy/Whitepaper/SE_WP_LCA_GEN24_Plus_EN.pdf

²⁴ Beispiel einer LCA für Mobiltelefone: https://www.fairphone.com/wp-content/uploads/2020/07/Fairphone_3_LCA.pdf

Verlauf der Validierung der Fronius LCA fanden ausführliche Recherchen und Diskussionen zu den Elektronikbauteilen, zur Materialzusammensetzung und -rückgewinnung und zur Validität von Sekundärdaten statt. Geprüft wurden der LCA-Bericht und die grundsätzliche Modellierungsstruktur. Die [kritische Prüfung](#) des Fraunhofer IZM ist auf der Fronius Website abrufbar.

Fronius nimmt außerdem aktiv an Gesprächen mit Gremien und Verbänden auf europäischer Ebene teil, um ein konsistentes und einheitliches LCA-Rahmenwerk in Europa zu fördern. Bis dahin können Schlüsse gezogen oder Vergleiche angestellt werden, sofern dabei mit Vorsicht und fallspezifisch vorgegangen wird.

4.2 Die nächsten Schritte: Auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit

Die LCA brachte tiefere Erkenntnisse über die Umweltleistung des Tauro ECO und stärkte das Bewusstsein dafür. Dadurch wurden vielfältige Möglichkeiten aufgedeckt, wie die Nachhaltigkeitsleistung von Fronius Geräten in Zukunft noch weiter ausgebaut werden kann.

Auf Basis dieser Ergebnisse werden spezielle Anforderungen definiert und in Produktentwicklungsprozessen integriert – womit sich einmal mehr zeigt, wie ernst es Fronius mit der Nachhaltigkeit ist. Eine wesentliche Rolle werden dabei Langlebigkeit, Effizienz, Reparierbarkeit und Recyclingmöglichkeiten von elektronischen Geräten spielen. Es wird Investitionen geben, die zum einen in die weitere Optimierung der Werkstoffe fließen und zum anderen auch in die Energieeffizienz entlang der Lieferkette sowie in der Produktions- und der Nutzungsphase durch die Verwendung von nachhaltigen und recycelten Produkten. Auf diese Weise werden Verbesserungen nicht nur den Kunden, sondern auch der Umwelt zugutekommen, wodurch Fronius die Nachhaltigkeitsleistung seines Portfolios weiter verbessern kann.

Durch das LCA-Projekt für den Tauro ECO 100 erlangte Fronius fundierte Kenntnisse über die Umweltleistung des Produkts auf verschiedenen Ebenen (Bauteile, Prozesse usw.). Diese Analyse kann aktiv genutzt werden, um noch nachhaltigere Produkte zu entwickeln und zahlreiche Nachhaltigkeitsanforderungen und -vorgaben für Wechselrichter und PV-Anlagen zu erfüllen.

Die LCA stärkt die führende Position von Fronius bei der Nachhaltigkeit von PV-Anlagen und kann dazu beitragen, dass auf Basis wissenschaftlich belegter Fakten umweltfreundliche PV-Anlagen eingeführt werden.

Die Detailtiefe, der Umfang, die Flexibilität der Szenarien und die Qualität und Transparenz des gesamten LCA-Prozesses für den Tauro ECO 100 sind einzigartig in der Welt der PV-Wechselrichter und fanden bisher lediglich bei der vorangegangenen LCA für den GEN24 Plus in dieser Form Anwendung.