

IEA Photovoltaik (PVPS) Task 12: Nachhaltigkeit von Photovoltaik

Arbeitsperiode 2018 - 2021

A. Indinger, M. Katzenschlager

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

12/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:

<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IEA Photovoltaik (PVPS) Task 12: Nachhaltigkeit von Photovoltaik

Arbeitsperiode 2018 - 2021

Mag.^a Dr.ⁱⁿ Susanne Schidler
Fachhochschule Technikum Wien

Thomas Haider, MSc.
Fachhochschule Technikum Wien

Magdalena Frank, MSc.
Fachhochschule Technikum Wien

Wien, Dezember 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract.....	9
3	Ausgangslage.....	10
	3.1. Hintergrund.....	10
	3.2. Stand des Wissens – Umweltwirkung von PV	11
4	Projekthinhalt.....	13
	4.1. Der IEA PVPS Task 12	13
	4.1.1. Methoden - Lebenszyklusanalyse.....	15
	4.1.2. Methoden – Untersuchung der Anwendungsfelder	20
5	Ergebnisse	22
	5.1. Subtask 1 – End of life PV Systems	22
	5.2. Subtask 2: LCA.....	23
	5.2.1. LCA des GFK Moduls	24
	5.3. Subtask 3 – Other sustainability topics.....	30
	5.4. Publikationen seit 2018	30
6	Vernetzung und Ergebnistransfer	32
	6.1. Nutzen der österreichischen Beteiligung am IEA PVPS Task 12	32
7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	34

1 Kurzfassung

Die österreichische Photovoltaik (PV)-Wirtschaft entwickelt sich zunehmend zu einer Zulieferindustrie, die internationale Zell- oder Modulproduzent:innen beliefert oder Nebenprodukte wie Einkapselungsfolien, Zellverdrahtungen, Sputtertargets, Wechselrichter, Batterien etc., auf dem Weltmarkt anbietet. Aus diesem Grund ist die aktive Mitarbeit in internationalen PV-Netzwerken wesentlich. IEA-PVPS ist das bedeutendste derartige Technologienetzwerk, die aktive österreichische Mitarbeit darin besteht seit 1993.

Ziel des IEA PVPS Task 12 ist es, internationale Zusammenarbeit im Bereich der Umweltwirkung und Nachhaltigkeit von PV zu unterstützen. Dazu gehören Erstellung und Dissemination von verlässlichen Informationen zu Umwelt, Gesundheit und Sicherheit, sowie aller Dimensionen der Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus der PV an Öffentlichkeit und Entscheidungsträger. Die Basis dazu wird in 3 Subtasks entwickelt:

- Subtask 1 – End of Life PV Systems,
- Subtask 2 - Life Cycle Assessment (LCA),
- Subtask 3 – Other Sustainability Topics

Der Beitrag der österreichischen Vertretung seitens des Forschungsbereichs „Renewable energy Systems“ an der FH Technikum Wien in Task 12 lag in den letzten beiden Jahren im Bereich des Subtask 2 – LCA– einer LCA eines flexiblen PV-Moduls, welches in Österreich produziert wird.

Schwerpunkte des Subtask 2 sind Methodenentwicklung und Datenerstellung für LCAs, Harmonisierung von Methoden, die Erstellung von Leitfäden etc. Damit sollen unterschiedliche Herangehensweisen harmonisiert und Anleitungen in Form von speziellen Parametern und Annahmen entwickelt werden. Diese bilden auch die Grundlage für die Arbeiten in den anderen Tasks.

Die im Rahmen der oben genannten LCA erfolgte Datenrecherche für ein neuartiges Produkt ergänzte hier die bereits bestehende Datengrundlage und konnte zeigen, dass die Umweltwirkung der flexiblen Module zumindest in größeren Anlagen unter denen der Standardglasmodule liegt.

2 Abstract

Austria's PV Industry is characterised by being a supply industry for global industry of module producers respectively system designers (encapsulation, wiring, sputter targets, inverters, batteries...). Active participation in the most important international PV network IEA-PVPS is therefore essential, Austria has been member since the beginning in 1993.

The aim of Task 12 is to foster international collaboration in the field of environmental impacts of PV. That includes the dissemination of reliable information on environment, health and safety as well as sustainability aspects along the whole lifecycle of PV.

The work is based on 3 modules:

- Subtask 1: End of Life PV Systems,
- Subtask 2: Life Cycle Assessment (LCA),
- Subtask 3 Other Sustainability topics.

Austria, represented by UAS Technikum Wien, R&D area „Renewable Energy Systems“ contributed mainly in Subtask 2 – conducting a LCA of a flexible PV Module produced in Austria.

Subtask 2 is focussing on the development of methodologies and data review for LCA, harmonisation of methods and development of guidelines. Aim is to harmonise different methods and approaches as well as to suggest specific parameters and assumptions. This builds the basis for work in other subtasks of task 12.

The data research for a new product carried out as part of the above-mentioned LCA are contributing to the existing data basis and was able to show that the environmental impact of the flexible modules is lower than that of the standard glass modules, at least in larger systems.

Recent work in Task 12 addresses leaching from semiconductors and contacts – focussing on toxic and hazardous substances, standards and technologies for PV recycling referring environmental impacts. A web service to show environmental impacts of PV based on GIS and local irradiation data is available as an intermediate version. A preliminary compilation of sustainability indicators was provided.

The following reports were published among others:

- Human health risk assessment methods for PV, Part 2 and 3: addressing risk of hazardous substances in case of breakage and deposit,
- PV Module Design for Recycling, Guidelines for future Design of Modules,
- newly revised Versions of „ Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity and,
- Methodological guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity.

3 Ausgangslage

Die Österreichische Photovoltaik-Wirtschaft zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich zunehmend zu einer Zulieferindustrie entwickelt, die internationale Zell- oder Modulproduzenten beliefert oder Nebenprodukte wie Einkapselungsfolien, Zellverdrahtungen, Sputtertargets, Wechselrichter, Batterien etc., auf dem Weltmarkt anbietet. Umso wesentlicher ist daher die aktive Mitarbeit in internationalen Photovoltaik Netzwerken. IEA PVPS ist das bedeutendste derartige Technologiennetzwerk, die aktive österreichische Mitarbeit darin besteht seit 1993.

3.1. Hintergrund

Das Wachstum des PV-Marktes gründet auf dem Versprechen der umweltfreundlichen Energieproduktion. Vor allen die umweltbewusste Öffentlichkeit trägt zu dieser Entwicklung bei. Diese Unterstützung ist wichtig für die Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie in Bezug auf die Gestehungskosten, und damit für deren Entwicklung zu einer grundlegenden Energiequelle. Daher ist es wichtig, kontinuierliche Aufmerksamkeit auf Umwelt-, aber auch auf Gesundheits- und Sicherheitsaspekte der Technologie zu richten, um Gesundheit und Umwelt, besonders in Bezug auf die zunehmende Verbreitung der Photovoltaik, zu bewahren und die Nachhaltigkeit entlang der Wertschöpfungskette zu verbessern. Vor diesem Hintergrund werden besonders gesamtökologische Betrachtungen, Lebenszyklusanalysen und Technikfolgenabschätzungen immer bedeutender.

Zudem zeigt die Marktentwicklung der PV in Österreich (siehe Abbildung 1), dass bei einer angenommenen Lebensdauer der Module von 30 Jahren (Frischknecht et al., 2016) kurzfristig noch geringe, mittelfristig jedoch kritische Mengen von außer Betrieb genommenen Anlagen für das Modulrecycling zu erwarten sind (Weckend et al., 2017). Hier kann durch die Mitarbeit in IEA PVPS Task 12 die Erfahrung anderer Länder mit Recyclingtechnologien, Logistik usw. genutzt und in weiterer Folge für österreichische Verhältnisse adaptiert und weiterentwickelt werden.

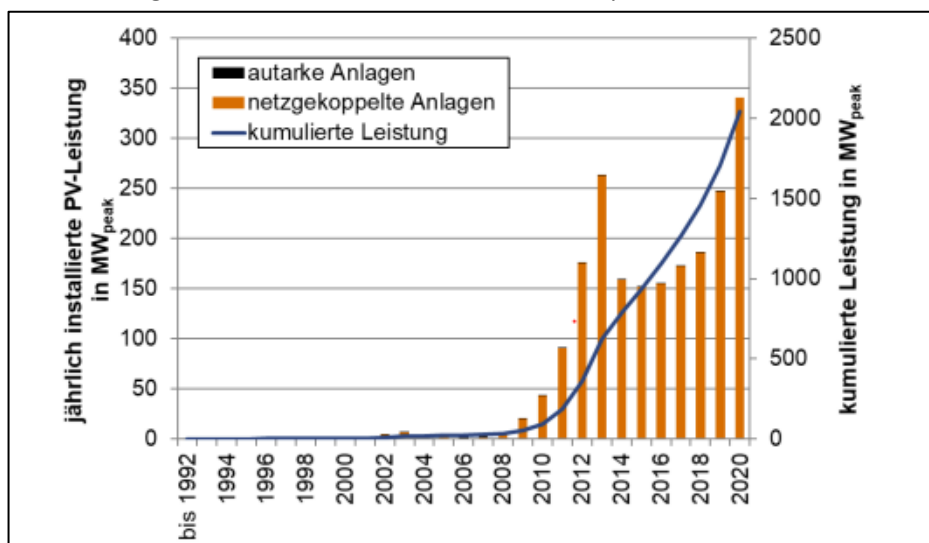


Abbildung 1: Kumulierte installierte PV-Leistung in kW_{peak} von 1993 bis 2020 (Biermayr et al., 2020)

3.2. Stand des Wissens – Umweltwirkung von PV

Der Bewertung von Umweltwirkungen von Technologien wird zunehmend Bedeutung zugemessen (siehe dazu auch Kaltschmitt & Schebek, 2015), sei es für Beratungs-, Informations- oder auch Marketingzwecke. Dies gilt auch für Technologien im Bereich der erneuerbaren Energie. Die Erstellung von Ökobilanzen (LCA) stellt eine anerkannte Methode zu deren Quantifizierung dar.

Unterschiedliche Herangehensweisen, sowohl beim Setzen von Systemgrenzen, der Definition der funktionellen Einheit als auch der verwendeten Eingangsparameter führen jedoch oft zu unterschiedlichen Ergebnissen. So liegen beispielsweise die Ergebnisse unterschiedlicher Studien für CO₂-Äqu. Emissionen für Photovoltaik zwischen ca. 40 und ca. 70 g CO₂-Äqu/kWh_{el} (siehe dazu auch National Renewable Energy Laboratory, 2015). Dadurch sind einerseits Vergleiche schwierig, andererseits sinkt möglicherweise das Vertrauen in die Methode und deren Ergebnisse. Eine Harmonisierung der Herangehensweisen kann Vergleichbarkeit schaffen und damit die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse unterstützen.

So geben Frischknecht et al. (2020) Empfehlungen zur Vereinheitlichung der Vorgangsweisen.

- Die Lebensdauern der einzelnen Komponenten werden wie folgt angegeben:
 - Module – 30 Jahre bei ausgereiften Technologien,
 - Wechselrichter – 15 Jahre für kleine Anlagen bzw. 30 Jahre mit Austausch von einzelnen Teilen alle 10 Jahre (diese müssen spezifiziert werden)
 - Transformatoren – 30 Jahre
 - Aufbau – 20 Jahre für dach- und fassadenmontierte PV, 30 – 60 Jahre für Freiflächenanlagen.
 - Verkabelung – 30 Jahre
- Die Ausrichtung ist als optimal für den Standort anzunehmen (Ausnahmen müssen dokumentiert werden)
- Für den Nutzungsgrad sind entweder standortspezifische Daten zu verwenden oder 0,75 für dachmontierte Anlagen, bzw 0,8 für Freiflächenanlagen – diese Werte enthalten bereits die Altersdegradation.
 - Altersdegradation wird mit 0,7 % pro Jahr angegeben, anderslautende Zahlen müssen dokumentiert werden.
- Back up Systeme und alle Aktivitäten die mit Handel, Administration usw. zusammenhängen sind nicht Teil der LCA – anderslautende Systemgrenzen müssen dokumentiert werden.
- Es wird empfohlen die Prozesskette in Foreground Processes (Prozesse, auf die Besitzer:innen oder Entscheidungsträger:innen Einfluss nehmen können) und Background Processes (ohne Einflussmöglichkeit) zu teilen.
- Für die Allokation bei multifunktionalen Prozessen (wenn mehrere Produkte gleichzeitig aus einem Ausgangsprodukt hergestellt werden), der Verwendung von Recyclingmaterialien und der Nutzung von Abfällen wird auf die Regelwerke der ISO 14044 verwiesen.
- Letztlich wird als funktionelle Einheit kWh zum Vergleich von unterschiedlichen (PV-) Technologien zur Stromerzeugung und m² zum Vergleich unterschiedlicher Aufbauten und Versorgungsinfrastruktur empfohlen.

Darüber hinaus ist die Datenlage für viele Prozesse unvollständig bzw. bestehen große Unterschiede zwischen den einzelnen PV-Technologien und Anlagenkomponenten wie Wechselrichtern, was die

Datenverfügbarkeit betrifft. So weisen zum Beispiel relevante Datenbanken wie ecoinvent¹ oder auch GEMIS² Datenlücken im Bereich Wasserverbrauch oder Energieeinsatz für viele Prozesse auf. Diese Lücken und aktuelle Entwicklungen, die Veränderungen der Umweltwirkung nach sich ziehen, werden laufend in den Datenrecherchen und Aktualisierungen der LCI-Studien adressiert. So war z. B. der Wasserverbrauch in der Produktion von PV-Modulen ein zentrales Thema der Arbeiten des IEA PVPS Task 12.

Das (zunehmende) Interesse an sogenannten „Consequential LCAs“, d.h. Untersuchungen die neben den Umweltwirkungen von Prozessen, Produkten usw. („Attributional LCA“) auch die (zukünftigen) Umweltwirkungen von (politischen) Maßnahmen, geplanten oder projektierten Veränderungen in Implementierung, Prozessen, Output usw. aufzeigen, macht weitere Datenrecherchen entlang der Wertschöpfungsketten unumgänglich. Da consequential LCA auch ökonomische Parameter wie beispielsweise dynamische Angebot-Nachfrage-Verhältnisse und ähnliches berücksichtigen muss, sind die betrachteten Systeme weit komplexer und die Robustheit und Verlässlichkeit der Inputdaten daher umso wichtiger (Schuller et al., 2020).

Wie Recherchen im Rahmen des IEA PVPS Task 12 gezeigt haben, ist die Datenlage zu LCA von Recyclingtechnologien und Maßnahmen nach wie vor weitgehend unvollständig. Zudem bestehen noch einige offene Fragen im Bereich der Logistik - sollen bestehende Transport-Systeme genutzt oder neue aufgebaut werden, sind die Zielgruppe eigene PV-Recyclingunternehmen oder das generelle Wertstoffrecycling - und anderen Teilbereichen. Eine umfassende Betrachtung unterschiedlicher nationaler oder auch regionaler Strategien und Lösungen, kann hier Good Practice Beispiele aufzeigen und weitere Entwicklungen wie zum Beispiel eine harmonisierte Implementierung der WEEE Richtlinie³ in diesem Technologiebereich unterstützen. Laufende Studien zeigen hier unterschiedlichste Ansätze

Die Arbeiten im Rahmen des Task 12 zum Thema „Risiken für die menschliche Gesundheit“ haben für die untersuchten Elemente – Cadmium und Blei – in den Modellen zwar gesundheitliche Risiken bei Deponierung und Beschädigung der Module gezeigt, die Werte lagen jedoch unter den gesetzlichen Grenzwerten. Die Risiken der Aspiration von Blei, Cadmium und-Selen bei Brand liegen in den Modellen ebenfalls unter den Grenzwerten (Sinha et al. 2019 und Sinha et al. 2020)

Erfahrungen und Ergebnisse dieses Projekts unterstützen die Weiterentwicklung der LCA-Methodik und den Vergleich unterschiedlicher Technologien und Einsatzgebiete.

¹ <https://ecoinvent.org>

² <https://www.umweltbundesamt.at/angebot/leistungen/angebot-cfp/gemis>

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32012L0019>

4 Projektinhalt

Das IEA Photovoltaic Power Systems Programm (IEA-PVPS, seit 1993) ist eines der gemeinschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekte der Internationalen Energieagentur. Ziel ist die Beschleunigung der Entwicklung und Anwendung der Photovoltaik als maßgebliche und nachhaltige erneuerbare Energiequelle. IEA-PVPS stellt die weltweit größte Plattform an PV-Expert:innen dar. In den acht derzeit aktiven Tasks arbeiten gesamt weit über 150 Expert:innen aus 28 Ländern. Österreich ist derzeit an 7 Tasks (1, 11, 12, 13, 14, 15, 17) aktiv beteiligt.

Das IEA-PVPS Programm stimuliert Aktivitäten, die

- Kosten von Photovoltaik-Anwendungen senken,
- Wert und Rolle der PV für Entscheidungsträger:innen deutlicher sichtbar machen,
- Hindernisse der breiteren Anwendung abbauen; und
- Kooperationen zwischen den OECD Ländern und mit anderen Ländern in technischen und nichttechnischen PV Themen stärken.

Österreich ist seit Beginn im IEA-PVPS Programm engagiert. Laufende Aktivitäten sind:

- ExCo: Die Mitarbeit im IEA-PVPS wird seit 2001 von Hubert Fechner (Technikum Wien) koordiniert. Seit 2011 ist Hubert Fechner stellvertretender Leiter des IEA PVPS Programmes.
- Task 1: Exchange and dissemination of information on photovoltaic power systems (H. Fechner, Technikum Wien)
- Task 11: PV hybrid systems within mini-grids (C. Mayr, AIT) 2012 abgeschlossen
- Task 12: PV Sustainability (S. Schidler, Technikum Wien)
- Task 13: Performance and Reliability of Photovoltaic Systems (K. Berger u. S. Zamini, AIT; G. Wallner IPMT; G. Oreski, PCCL)
- Task 14: High Penetration of PV Systems in Electricity Grids (R. Bründlinger, C. Mayr, AIT – beide sind Operating Agents dieses Tasks).
- Task 15: Building Integrated Photovoltaic Systems (P. Illich, Technikum Wien)
- Task 17 PV and transport (Maximilian Rosner DAS)

4.1. Der IEA PVPS Task 12

Ein Ziel des IEA PVPS Task 12 ist es, internationale Zusammenarbeit im Bereich der Nachhaltigkeit von Photovoltaik zu unterstützen. Die in Task 12 vertretenen Staaten sind: Australien, Österreich, China, Frankreich, Großbritannien, Italien, Japan, Korea, Norwegen, Spanien, Schweden, Schweiz, die Niederlande und die USA. Darüber hinaus sind SolarPower Europe (ehemals European Photovoltaic Industry Association) und First Solar Mitglieder des Task. Insgesamt besteht das Team des Task aus 24 aktiven Expert:innen.



Abbildung 2: Ein Teil der Expert:innengruppe des IEA PVPS Task 12 bei einem Meeting in Sidney (11/19)

Inhaltliche Ziele sind die Bereitstellung von umwelt-, gesundheits- und sicherheitsrelevanten Informationen sowie zu sozioökonomischen Impacts über den gesamten Lebenszyklus der Photovoltaik - für die Öffentlichkeit ebenso wie für Entscheidungsträger:innen.

Für das weitere Marktwachstum im Bereich der Photovoltaik ist es wichtig sowohl für die sorgfältige Planung und Bewilligung von großen PV-Anlagen als auch für die Information von Kund:innen über Auswirkungen von PV auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit Informationen bereit zu stellen. Dies ist einerseits wichtig um das Vertrauen in die Technologie zu stärken und andererseits um Entscheidungsträger:innen zu unterstützen.

Darüber hinaus setzen die Aktivitäten des Task Standards sowohl für Hersteller:innen als auch Bereitsteller:innen, die eine Verbesserung der Prozesse entlang der Wertschöpfungskette hinsichtlich aller Dimensionen der Nachhaltigkeit fördern können. Dazu wurden folgende Ziele definiert:

Subtask 1: End of Life PV Systems:

- Begleitung der Entwicklung von Sammel-Infrastrukturen durch das Assessment von bestehenden Strukturen
- Verbesserung der Kommunikation mit und zwischen verschiedenen Unternehmen, um den Informationsaustausch über Ressourcen zu fördern

- Aufzeigen von technischen und ökonomischen Machbarkeiten besonders für Entscheidungsträger:innen
- Identifikation von Möglichkeiten zur Finanzierung bzw. Kostenteilung

Subtask 2: Life Cycle Assessment LCA)

- Aufzeigen der Umweltvorteile der PV gegenüber anderen Technologien, anhand von umfassenden Studien entlang des gesamten Lebenszyklus.
- Aufzeigen der Verbesserungspotenziale der Umweltperformance von PV anhand definierter Parameter wie Klimawirkung, Energy Payback Time etc.
- Jährliche Updates der Daten und Prozesse
- Evaluierung der Umweltvorteile anhand vermiedener Auswirkungen wie z. B externer Kosten

Subtask 3: Other sustainability topics

- Entwicklung von Risikofaktoren und Vergleiche mit anderen Technologien
- Identifizierung von Unfallvorsorge und Kontrollfunktionen für definierte Technologien
- Identifikation von Technologien zur Kontrolle der Verschmutzung durch die wichtigsten Herstellungstechnologien
- Identifikation von Maßnahmen zur Vermeidung und Kontrolle von Treibhausgasen bei der Produktion

Darüber hinaus erfolgt die Disseminierung der Ergebnisse der Analysen an alle Stakeholder und die Öffentlichkeit durch Veröffentlichungen, Vorträge, Factsheets, Unterstützung von Netzwerken und Medien.

Der österreichische Beitrag zu Task 12 lag vor allem in Subtask 2 – LCA. Im Themenbereich LCA werden neben dem Einbringen der Expertise in die Entwicklung von methodischen Leitfäden – wie zu LCA von Photovoltaik - auch Daten aus nationalen Projekten zur laufenden Verbesserung von Datenbanken wie ecoinvent sowie der Studien des Expert:innenteams bereitgestellt. Darüber hinaus wurde eine LCA eines flexiblen Moduls, eines österreichischen Produkts, durchgeführt

Zur Disseminierung wurden Vertreter:innen zu Vorträgen eingeladen. Seitens der österreichischen Vertretung wurde ein internationaler Vernetzungs-Workshop veranstaltet, der den Erfahrungs- und Wissensaustausch zwischen Taskmitgliedern und nationalen Expert:innen ermöglichte.

4.1.1. Methoden - Lebenszyklusanalyse

Schwerpunkte des Task 12 und hier im Besonderen Subtask 2 sind Methodenentwicklung und Datenrecherche bzw. -bereitstellung für LCAs, Harmonisierung von Methoden, die Erstellung von Leitfäden etc. Basis des methodischen Vorgehens bildet das Rahmenwerk der ISO 14040 und 14044. Dieses Rahmenwerk gibt die Vorgehensweise bei der Erstellung von Lebenszyklusanalysen vor.

Die folgende Abbildung zeigt das systematische Vorgehen in 4 Schritten.



Abbildung 3: Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040

Schritt 1: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Der erste Schritt bei der Erstellung einer Lebenszyklusanalyse ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (Anwendungsbereich, Erkenntnisinteresse, Zielgruppe(n), Vergleichsszenarien/Öffentlichkeitsarbeit).

Ziel der durchgeführten LCA war die Gegenüberstellung der flexiblen Module aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) der Fa. DAS Energy, Wr. Neustadt,⁴ und vergleichbaren herkömmlichen Glas/Aluminium-Modulen hinsichtlich ihrer Klimawirkung.

Neben der Zieldefinition müssen das Produktsystem sowie die technischen, geografischen und zeitlichen Systemgrenzen eindeutig beschrieben werden. Zur Beschreibung des Produktsystems eignet sich am besten ein Systemfließbild, in dem die Prozessmodule und ihre Wechselbeziehungen dargestellt werden. Das Systemfließbild ist eine grafische Darstellung des untersuchten Produktsystems, wobei jedes Kästchen einen Prozess darstellt und die verbindenden Pfeile zwischen diesen Prozessmodulen die funktionale Abhängigkeit untereinander symbolisieren. Die folgende Abbildung zeigt die Prozesskette für den flexiblen GFK Modul. Wichtig ist dabei auch die Berücksichtigung der Transporte, die zwischen den Prozessen stattfinden.

⁴ Zu finden unter <https://das-energy.com/de/home>

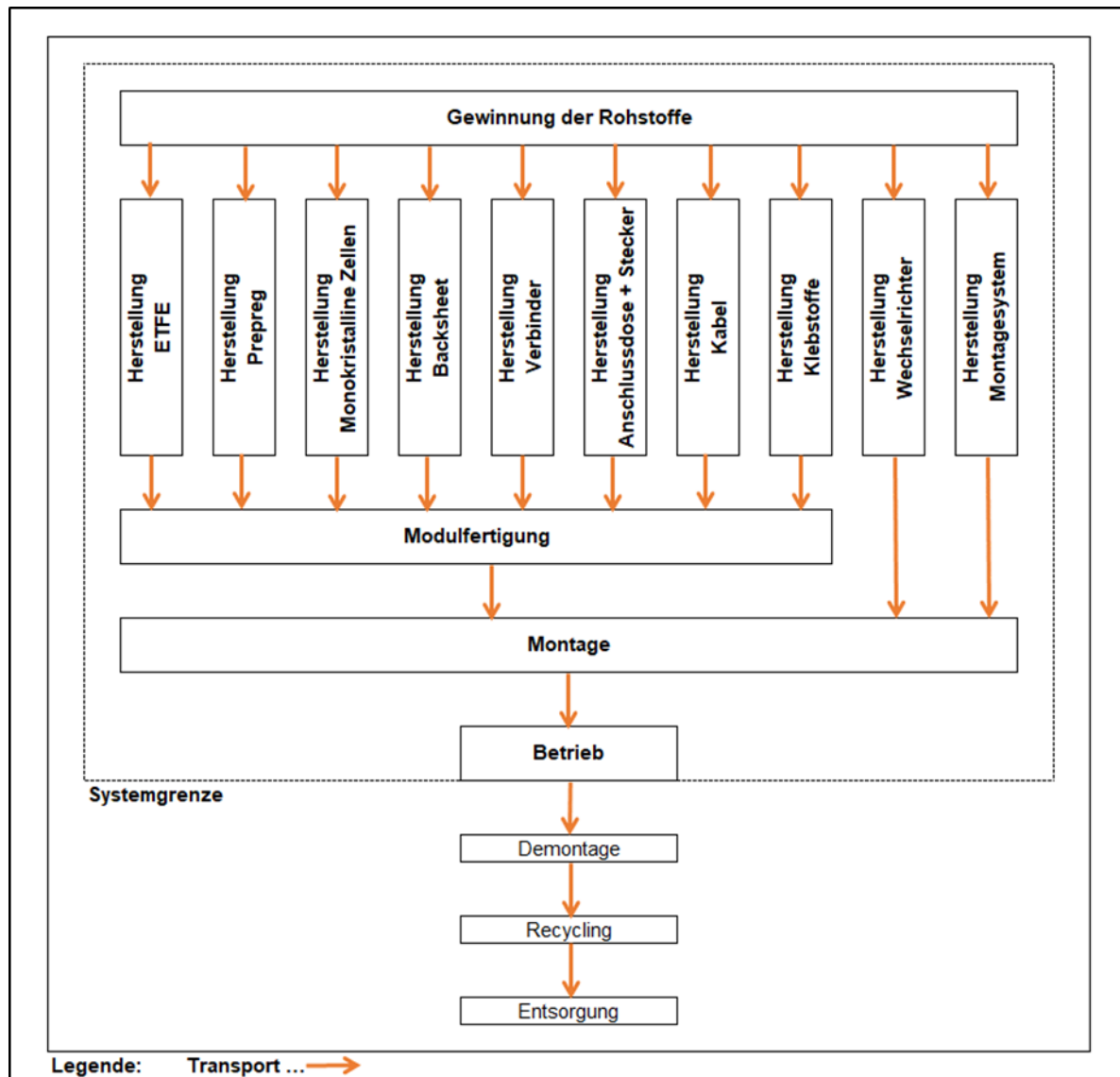


Abbildung 4: Prozesskette für die Herstellung von GFK Modulen (eigene Darstellung)

Die technischen Systemgrenzen dienen dazu, festzulegen, welche Stoff- und Energieströme in der Sachbilanz berücksichtigt werden und welche nicht.

Für PV wird empfohlen die gesamte Anlage inklusive Modulen, Aufständern, Wechselrichtern, Verkabelung usw. zu betrachten, jedoch nicht die Backup-Systeme (Frischknecht et al., 2020). Die Herstellung der Teile von der Rohstoffgewinnung an ist einzubeziehen, nicht jedoch alle Aktivitäten in Zusammenhang mit Administration, Handel usw. Die Herstellungsinfrastruktur wie Gebäude, Maschinenhallen usw. kann im Falle der Datenverfügbarkeit berücksichtigt werden, muss dann jedoch transparent dokumentiert werden.

Die Abbildung zeigt, dass in der durchgeführten LCA Herstellung und Montage bis zum Betrieb berücksichtigt werden, Demontage und Recycling – aufgrund der noch nicht bekannten Recyclingplanung des Unternehmens - aber nicht.

Um diese Entscheidung nachvollziehbar und transparent treffen zu können, werden in der Norm ISO14044 ff. die Abschneidekriterien Masse-, Energie und Umweltrelevanz genannt.

Zusammengefasst gilt, dass Stoff- und Energieströme, deren Masse- und Energieanteil am Gesamtsystem geringer als 1 % ist, nicht berücksichtigt werden müssen. In Summe darf der abzuschneidende Anteil pro Prozessmodul 5 % nicht überschreiten. Bevor ein Stoff- oder Energiestrom aufgrund des Massen- oder Energieanteils abgeschnitten wird, ist dessen Umweltrelevanz zu überprüfen. Damit soll verhindert werden, dass z. B. hochtoxische Stoffe oder Emissionen aufgrund eines geringen Masse- oder Energieanteils vernachlässigt werden. Die geografischen und zeitlichen Systemgrenzen beeinflussen in erster Linie die Datenerhebung. Es wird festgelegt, woher die Stoff- und Energieströme stammen und für welche Zeitspanne sie gelten.

Bei einer Ökobilanz werden immer Systeme mit vergleichbarem Nutzen und nicht konkrete Produkte oder Dienstleistungen bewertet bzw. verglichen. Dieser vergleichbare Nutzen wird durch die funktionelle Einheit beschrieben. Die funktionelle Einheit ist laut ISO 14040 der Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanz-Studie. Sie beschreibt, welchen Nutzen das Produktsystem erfüllt und ermöglicht damit einen technologie- oder produktunabhängigen Vergleich. Dadurch können Produkte und Dienstleistungen miteinander verglichen werden, wenn diese denselben Nutzen erfüllen (ISO 14040).

Für LCAs im Bereich der PV eignet sich als funktionelle Einheit, wie schon einleitend angeführt, „kWh“ für den Vergleich von Anlagen – auch mit anderen energiebereitstellenden Technologien, „m²“ für den Vergleich von Gesamtanlagen über deren Flächenverbrauch. Für den Vergleich von PV-Technologien selbst eignet sich der Flächenparameter aufgrund von Unterschieden in Effizienz von Modulen und Wechselrichtern sowie der Nutzungsgrade nicht.

Abschließend wird festgelegt, welche Wirkungskategorien in der Studie angewendet werden sollen. Eine Wirkungskategorie stellt dabei eine Klasse dar, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können. Hier wurde die Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ gewählt und alle Treibhausgasemissionen auf eine einzige Bezugsgröße (Global Warming Potential in kg CO₂-Äquivalente) umgerechnet, um den Einfluss auf die Klimaerwärmung quantifizieren bzw. beurteilen zu können. Bei der Datenerhebung sind die gewählten Wirkungskategorien zu berücksichtigen (Klöpper & Grahl, 2009).

Hier wird die Klimabilanz der untersuchten Module dargestellt und der eines vergleichbaren herkömmlichen PV-Moduls gegenübergestellt.

Schritt 2: Erstellung der Sachbilanz

Laut ISO 14040 ist die Sachbilanz jener Bestandteil der Ökobilanz, im Zuge dessen die Zusammenstellung und Quantifizierung der Inputs und Outputs eines Produktsystems erfolgt. Ziel der Sachbilanz ist die Berechnung der kumulierten Emissionen (Outputs) und Ressourcenverbräuche (Inputs) über den Lebensweg des zu untersuchenden Produktsystems. Dazu erfolgt eine oftmals vereinfachte Systemanalyse der Stoff- und Energieströme des Produktsystems aufbauend auf dem bereits identifizierten Systemfließbild bzw. dessen Prozessmodulen. In einem weiteren Schritt werden die In- und Outputs für jedes Prozessmodul sowie deren Menge genau spezifiziert. Um die Daten der gesamten Sachbilanz nicht „von Grund auf“ neu erheben zu müssen, können Ökobilanz-Datenbanken (z. B. ecoinvent) verwendet werden. Solche Datenbanken beinhalten bereits Ökobilanz-

Daten für unzählige Prozesse. Softwareprogramme für Ökobilanzen vereinfachen die Erstellung der Sachbilanz.

Es wurde die Software openLCA verwendet.

Die geographische Systemgrenze wird nicht eingeschränkt, da für die einzelnen Komponenten weltweit Produktionsstätten vorhanden sind.

Für die Ermittlung der Distanzen der Transportwege wurden für den LKW-Transport Google Maps verwendet (Google Maps, 2021). und für Transporte über den Seeweg SeaRates herangezogen (SeaRates, 2021). SeaRates ist ein Onlineprogramm zur multimodalen Berechnung von Transportwegen per LKW, Schiff und Flugzeug.

Schritt 3: Durchführung der Wirkungsabschätzung

Eine Ökobilanz dient dazu, die Umwelteinflüsse und potenziellen Umweltwirkungen, die mit einem Produktsystem zusammenhängen, zu erfassen und zu quantifizieren. Während Umwelteinflüsse bzw. -aspekte die Ursachen beschreiben, beschreiben die Umweltwirkungen die dadurch eintretende Veränderung der Umwelt (Springer Gabler Verlag, 2015). Die Sachbilanz liefert dabei die Umwelteinflüsse (z. B. Energieverbrauch). Im Zuge der Wirkungsabschätzung werden daraus die potenziellen Umweltauswirkungen abgeleitet, sprich es werden Größe und Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen beurteilt (Klöpffer & Grahl, 2009).

Schritt 4: Auswertung und Interpretation

Im letzten Schritt erfolgt die Interpretation der Ergebnisse. Zusätzlich werden Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen und deren Unsicherheiten abzuschätzen oder zu quantifizieren. Unsicherheiten können sich aus den Annahmen und Entscheidungen, den erfassten Daten sowie den Bewertungsfaktoren der verwendeten Bewertungsmethoden ergeben.

Im Rahmen der Leitfadenerstellung bzw. deren Überarbeitung wurde und wird diese Vorgehensweise für PV-Komponenten konsistent gestaltet. Das Ziel ist es dabei, unterschiedliche Herangehensweisen zu harmonisieren und Anleitungen in Form von speziellen Parametern und Annahmen, Systemgrenzen und funktioneller Einheit zu entwickeln. Zudem liefern umfangreiche Recherchen zu Inputströmen der einzelnen Prozesse und deren Aufbereitung zur Veröffentlichung bzw. Lesbarkeit in LCA-Tools, die Grundlage für die Erstellung von LCAs. Die Recherchen erfolgen dabei direkt bei Hersteller:innen, in Literatur und Internetrecherchen; Annahmen werden durch die Expertise der Task-Mitglieder und durch Einbeziehung von externen Expert:innen abgesichert.

Diese Untersuchungen umfassen den Lebenszyklus von der Herstellung bis zum Lebensende eines PV- Moduls bzw. -Systems und können somit auch Beträge zum dem in der EU geplanten Lieferkettengesetz (Europäisches Parlament, 2021) und auch zur geplanten CO₂ Bepreisung (CBAM) leisten (European Commission, 2021).

In Bezug auf die Lieferketten ergibt sich ein weiteres aktuelles Thema. Im Rahmen der COVID-19 Pandemie auftretende Störungen haben zu Überlegungen geführt, globale Lieferketten wieder vermehrt nach Europa zurückzuholen (Hosp, 2021). Hier ist es interessant zu untersuchen, welche Umweltwirkung diese Verlagerungen haben können.

Die Untersuchung eines österreichischen Produkts nach den standardisierten Methoden gibt dem Unternehmen die Möglichkeit sich im Geschäftsfeld deutlich zu positionieren. Parallel dazu wurde, um zukünftige, zusätzliche Anwendungsfelder für flexible Module zu zeigen eine technische Potenzialanalyse für die GFK Module durchgeführt. Die Verknüpfung der Ergebnisse kann neben quantitativen auch qualitative Aspekte des Einsatzes der Module aufzeigen.

4.1.2. Methoden – Untersuchung der Anwendungsfelder

Verglichen wurden GFK-Technologie, Dünnschichttechnologien CIGS und a-Si und Dickschichtmodule.

In einem ersten Schritt wurden die Moduleigenschaften identifiziert, die besonders wichtig für die Unterscheidung der verschiedenen Modultypen und ihre Anwendungsfelder sind. Diese waren:

- (geringes) Gewicht
- (geringe Dicke) (hohe) Flexibilität
- Ästhetik (Farbe, Form, Größe, Semitransparenz)
- hohe flächen-spezifische PV-Leistung"

In einem 2. Schritt wurden Anwendungsfelder identifiziert und in einzelne Anwendungen untergliedert. Die Anwendungsfelder waren:

- Mobilität (Fahrzeuge)
- Mobilität (Infrastruktur)
- Kleinanwendungen
- Gebäudeelemente
- Gebäudedächer
- Technologiesysteme
- Agro-PV
- Spezialanwendungen

In einer Nutzwertanalyse wurden zusammen mit Expert:innen die einzelnen Eigenschaften aus Schritt 1 für die Anwendungen aus Schritt 2 gewichtet. Die folgende Tabelle zeigt ein Beispiel dieser Gewichtung.

Tabelle 1: Gewichtung der gewählten Moduleigenschaften für das Anwendungsfeld Mobilität

	Anforderungen an die PV: Gewichtung nach Wichtigkeit/Relevanz in %					
	geringes Gewicht	geringe Dicke	hohe Flexibilität	Ästhetik (Farbe, Form, Größe, Semitransparenz)	hohe flächen-spezifische PV-Leistung	Summe
Mobilität (Fahrzeuge)						
E-Autos	25	17	17	25	16	100
Großfahrzeuge	25	17	10	25	23	100
Kleinfahrzeuge	27	15	15	25	18	100

Anschließend wurde der Erreichungsgrad der Eigenschaften für die einzelnen Technologien festgelegt und mit der Gewichtung multipliziert (siehe folgende Tabelle). Dieser ergibt sich aus den technischen Daten der Module.

Tabelle 2: Erreichungsgrad der Moduleigenschaften und Ergebnisse für das Anwendungsfeld Mobilität

	Erreichungsgrad der Anforderungen: GFK Technologie (Punkte 1-5)					Ergebnis
	geringes Gewicht	geringe Dicke	hohe Flexibilität	Ästhetik (Farbe, Form, Größe, Semitransparenz)	hohe flächen-spezifische PV-Leistung	GFK
Mobilität (Fahrzeuge)	4	5	2	4	4	
E-Autos	100	85	34	100	64	383
Großfahrzeuge	100	85	20	100	92	397
Kleinfahrzeuge	108	75	30	100	72	385

Die Ergebnisse dieser Berechnungen machen einen anwendungsspezifischen Vergleich der Modultypen möglich.

Die Erweiterung der Anwendungsfelder für PV Module durch die Entwicklung neuer Technologien zusammen mit der Untersuchung ihrer Umweltwirkung kann Aufschluss über Forschungs-, Entwicklungs- und Optimierungspotenziale geben.

5 Ergebnisse

Die Ziele der Periode 2019 bis 2021 wurden grundsätzlich erreicht. Der folgende Abschnitt zeigt die Ergebnisse dieser Periode in der Struktur der Subtasks.

5.1. Subtask 1 – End of life PV Systems

Ein Leitfaden zum Design for Recycling wurde entwickelt. Dieses Design ist notwendig um Kreislaufwirtschaft zu unterstützen und damit zukünftige Materialengpässe zu vermeiden. Im Leitfaden werden spezielle Herausforderungen für das Design von PV-Modulen identifiziert. So haben die Zusammensetzung des Backsheets und die Wahl der Metalle einen signifikanten Einfluss auf die Recyclbarkeit der Module. Zudem ist es wichtig, die Einkapselungen zu minimieren oder reversibel zu gestalten. Je höher die Komplexität der Materialien, desto schwieriger wird auch das Recycling. Neue Dichtungsmittel im Aluminium-Rahmen können eine Zerlegung ohne Zerstörung der Komponenten ermöglichen.

(Österreichischer Beitrag: Review)

Nähere Informationen finden sich hier:

Jose I. Bilbao, Garvin Heath, Alex Norgren, Marina M. Lunardi, Alberta Carpenter, Richard Corkish, 2021, PV Module Design for Recycling, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/10/T12_2021_PV-Design-for-Recycling-Guidelines_Report.pdf

Ein zweiter Bericht betrifft die ökonomische und ökologische Machbarkeit einer Kreislaufwirtschaft im Bereich PV. Die Autor:innen kommen zu dem vorläufigen Schluss, dass es aus ökologischer Sicht jedenfalls besser ist, die Module bis zum Ende Ihrer 30-jährigen Lebensdauer zu nutzen, statt sie vorher gegen effizientere Technologien auszutauschen. Für moderne effiziente Module stimmt das auch aus ökonomischer Sicht. Die Wiederverwendung von Modulen nach ihrer Lebensdauer scheint aus ökonomischer Sicht nicht darstellbar.

Nähere Informationen finden sich hier:

N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, D. Ravikumar. 2021. Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/IEA_PVPS_T12_Preliminary-EnvEcon-Analysis-of-module-reuse_2021_report.pdf

5.2. Subtask 2: LCA

Eine vierte, überarbeitete Version der *LCA Guidelines* wurde veröffentlicht. Die ISO 14040 und 14044 lassen den Anwender:innen einigen Spielraum bei der Ausführung von Lebenszyklusanalysen. Die Guidelines zielen daher auf die Konsistenz und Harmonisierung der Methode für die Anwendung im PV-Bereich. Sie stellen einen Konsens zwischen Expert:innen aus den USA, Europa und Asien über PV-Performance, Prozessinputs und Emissionsallokationen, sowie Assessmentmethoden und Berichterstattung dar. Dies ist deshalb wichtig, weil viele Parameter in unterschiedlichen geografischen Zonen variieren. Dies und die Wahl der Systemgrenzen können das Ergebnis signifikant verändern.

(Österreichischer Beitrag: Review)

Nähere Informationen finden sich hier:

R. Frischknecht, P. Stolz, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha, M. de Wild-Scholten, 2020, *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*, 4th edition,
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_Task12_LCA_Guidelines.pdf

Eine LCA für PV-Batteriesysteme zeigt steigende Umweltauswirkungen mit steigender Kapazität der Batterie. Jedoch sinken diese mit der Lebensdauer der Batterie. Eine Erhöhung der Ladezyklen hat hier starke Auswirkungen. Im Vergleich mit der Stromerzeugung aus Gas als Backup-System zeigt die Kombination PV und Batterie jedoch die niedrigeren Umweltwirkungen.

(Österreichischer Beitrag: Review)

Nähere Informationen finden sich hier:

L. Krebs, R. Frischknecht, P. Stolz, P. Sinha, 2020, *Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems*
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_PVPS_Task12_LCA_PVandStorage.pdf

Net Energy Analysis (NEA) ist eine strukturierte umfassende Methode, um zu zeigen, in welchem Ausmaß eine gegebene Energiequelle die entlang ihrer Wertschöpfungskette investierte Energie wieder erzeugen kann. Das methodische Rahmenwerk lässt Anwender:innen jedoch einigen Spielraum bei der Auswahl von Parametern und Annahmen. Die vorliegenden Guidelines wurden entwickelt und überarbeitet, um Konsistenz und Harmonisierung bei der Berechnung herzustellen. (Österreichischer Beitrag: umfangreiche Diskussionen zur Methode, Review und Feedback)

Der Leitfaden befindet sich hier:

M. Raugei, R. Frischknecht, C. Olson, P. Sinha, G. Heath, 2021. *Methodological guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity*, 2nd Edition
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/06/IEA_PVPS_Task12_Methodological_Guidelines_NEA_2021_report.pdf

5.2.1. LCA des GFK Moduls

Die Daten für die Sachbilanz des Moduls stammen überwiegend vom Hersteller DAS Energy.⁵ Der Aufbau, bzw. die Materialien des Moduls zeigt die folgende Abbildung.

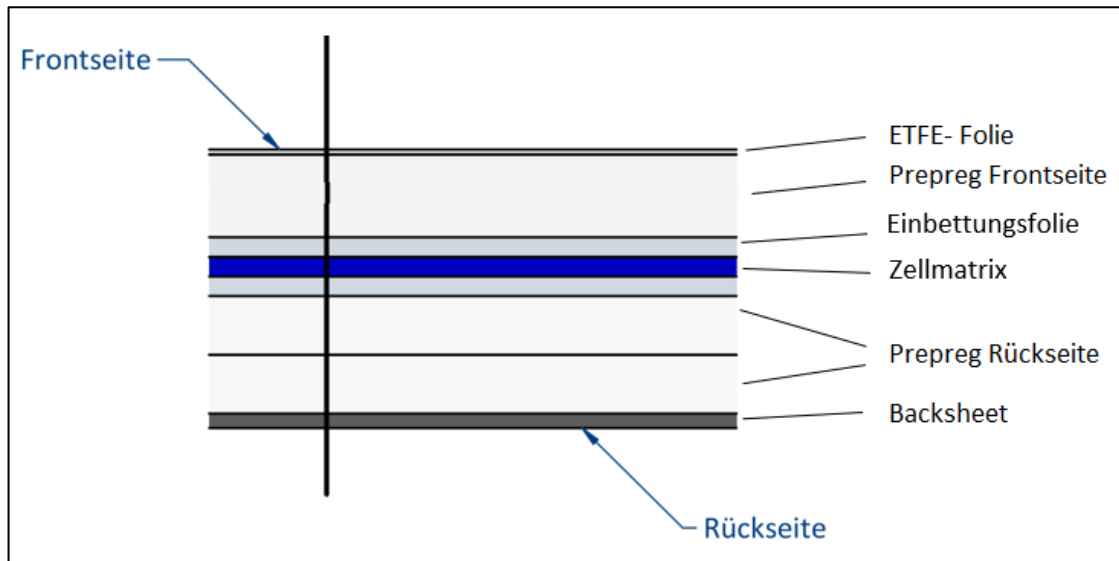


Abbildung 5: Lagenaufbau des GFK-Moduls (eigene Abbildung)

Eine wichtige Komponente des Moduls sind die Prepreg-Schichten. Prepreg steht für „preimpregnated Materials“ und bezeichnet ein vorimprägniertes Halbzeug. Bei diesem werden Fasern und Kunststoffmatrix in einem definierten Verhältnis zueinander gemischt. Zur Herstellung werden thermoplastische und duroplastische Kunststoffe eingesetzt (AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V, 2013).

Eingangsdaten

Die Massen der einzelnen Materialien, die Transportleistung entlang der Wertschöpfungskette und der Energieeinsatz für die Produktion vor Ort, wurden aus den Herstellerangaben errechnet. Die folgende Tabelle zeigt die Sachbilanz für einen Modul mit 11 x 6 monokristallinen Zellen. Der Modul hat die Maße 1,917 mm x 1,00 mm (Länge x Breite) und somit eine Fläche von 1,917 m². Die Leistung des Modules beträgt 0,33 kWp und es werden PV- Zellen im M3- Format verwendet. Für die Berechnung der Fertigungsprozesse entlang der Wertschöpfungskette wurden die jeweiligen regionalen Strommixe verwendet.

⁵ <https://das-energy.com/de/home>

Tabelle 3: Sachbilanz des GFK-Moduls

Komponente	Material	Masse [kg]	Produktionsort
ETFE-Folie	ETFE	0,187	Deutschland
Prepreg Frontseite	GFK- Werkstoff	1,000	China: 33,6 % Österreich: 66,4 %
EVA-Folie	EVA	0,969	China
Monokristalline PV- Zellen (66 Stk.)		0,782	China
Verbinder Zellen	Kupfer	0,165	Österreich
Verbinder String	Kupfer	0,033	Österreich
Prepreg Rückseite	GFK- Werkstoff	3,114	China: 52 % Österreich: 48 %
Backsheet	PET	0,521	Deutschland
Anschlussdose	PPE + PS	0,135	Tschechien
Stecker (2x)	PPE + PS	0,014	
PV-Kabel (2 x 0,9m)	PE + Kupfer	0,072	
Kleber	Silikon	0,010	Belgien
Vergussmasse	Silikon	0,040	Deutschland
Gesamt		7,041	
Verschnitt 8 %		0,463	
Gesamt nach Verschnitt		6,578	

Die gesamte Transportleistung beträgt 2,24 tkm in China mit LKW, 5,49 tkm in Europa mit LKW, 60,31 tkm mit dem Frachtschiff.

Ergebnisse

Das Treibhauspotential von 255,75 kg CO₂-Äqu. eines Moduls und die Aufteilung auf seine einzelnen Komponenten zeigt die folgende Abbildung. Den größten Teil nehmen dabei die ETFE Folie (49,82 kg CO₂-Äqu.) und die Zellen (158,23 kg CO₂-Äqu.) ein.

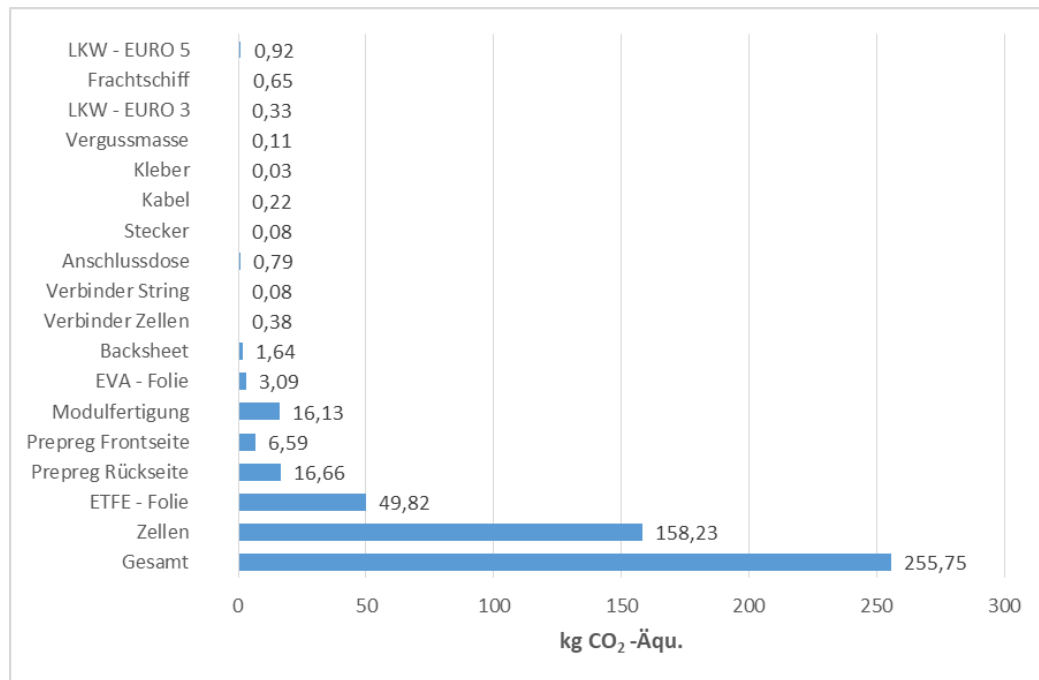


Abbildung 6: Treibhauspotential GFK Modul – Zellproduktion in China

Für die in China hergestellten Komponenten (siehe Tabelle 3) wurden Hersteller in Europa recherchiert. Komponenten, für welche Herstellungsorte gefunden werden konnten, sind in der folgenden Abbildung mit RER bezeichnet. Von diesen Standorten wurde eine Durchschnittstransportentfernung zum Modulhersteller in Wr. Neustadt errechnet. Als Strommix für die Herstellung der Einzelkomponenten wurde der ENTSO-E Mix angenommen. Durch die Herstellung der Komponenten in Europa verringert sich das Treibhauspotenzial um fast 70 % (siehe Abbildung 7) und liegt in Summe bei 175,29 kg CO₂-Äqu. Dies ist zu einem erheblichen Teil auf die Reduktion der Emissionen der Zellproduktion (79,62 kg CO₂-Äqu.) zurückzuführen. Dabei kommen sowohl verringerte Transportwege als auch der Energiemix mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energieträger zum Tragen. Es zeigt sich also, dass die Produktion neben der Verkürzung der Lieferkette einen erheblichen Einfluss auf die Klimawirkung hat.

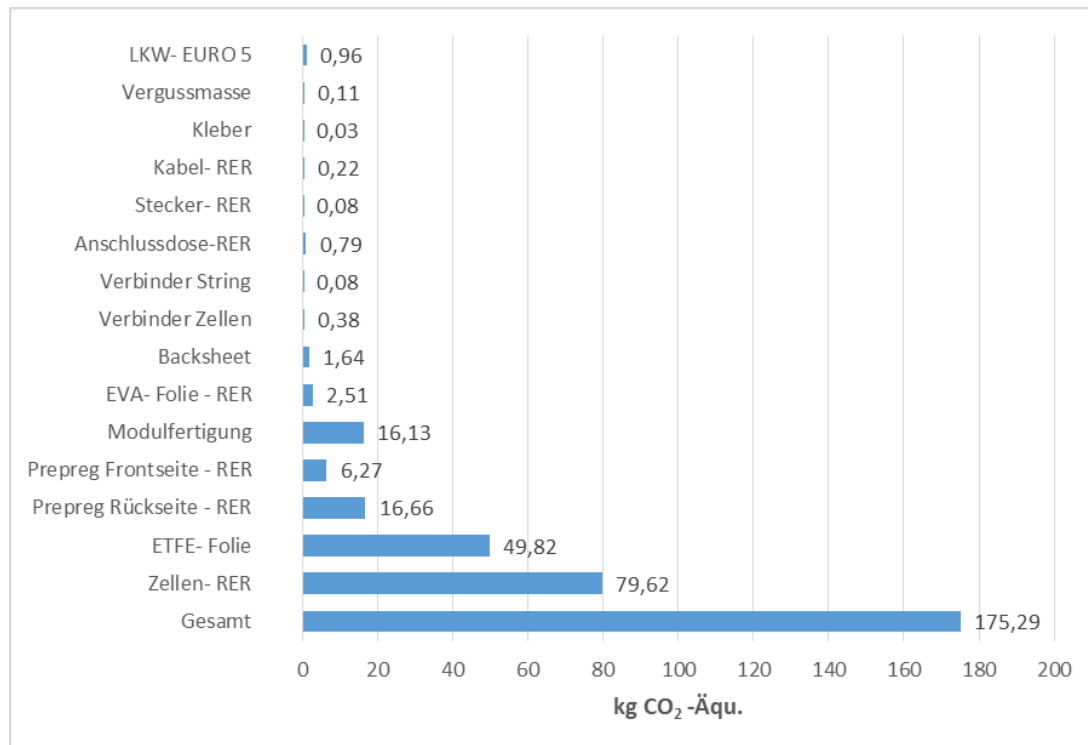


Abbildung 7: Treibhauspotenzial GFK Modul – Zellproduktion in Europa

Um das Ergebnis im PV-Sektor einordnen zu können wurde für einen Vergleich mit dem GFK- Modul die Herstellung vergleichbarer Glasmodule in openLCA berechnet. Betrachtet wird jeweils ein Glas-Folien- Modul mit und ohne Aluminiumrahmen, welche in China hergestellt werden. Zusätzlich wurden die jeweils notwendigen Montagesysteme für die Befestigung der Module auf dem Dach und die Wechselrichter berücksichtigt. Für die Berechnungen werden Daten aus Frischknecht et al. (2020) verwendet.

Um den Bezug zur funktionellen Einheit kWh herstellen zu können, müssen Einstrahlung und damit der Ertrag berücksichtigt werden. Folgende Annahmen wurden dazu getroffen:

Die Module werden in Österreich betrieben. GFK- Module werden auf die Dachbahn geklebt. Dadurch entfällt das Montagesystem, jedoch verringert sich der Ertrag um den Faktor 0,93 (Photovoltaic Austria, 2021). Die Glasmodule werden optimal mit 30° Neigung und südlicher Ausrichtung (Azimut von 0°) ausgelegt. (Photovoltaic Austria, 2021). Es wird eine Moduleffizienz von 17,2 % für die GFK- Module (DAS Energy GmbH, 2021) und für die Glasmodule ein Wert von 19,5 % (Frischknecht et al. 2020a) gewählt.

Die Ergebnisse für unterschiedliche Anlagendimensionierungen zeigt die folgende Abbildung. Zusätzlich aufgezeigt werden noch die Einsparungspotenziale für in Europa hergestellte GFK Module.

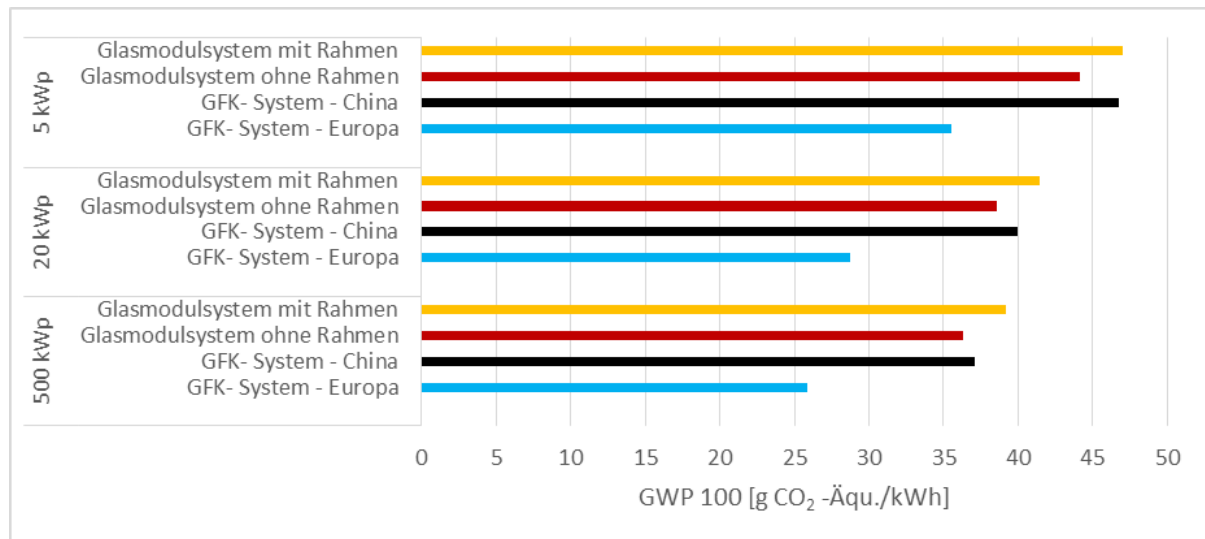


Abbildung 8: Vergleich der Klimapotenztiale von unterschiedlichen Anlagendimensionen und Modultypen

Die Werte des Global Warming Potentials (GWP) der GFK-Module liegen bei kleineren Anlagen im Bereich der Glasmodule mit Rahmen (ca. 47 g CO₂-Äqu./kWh), bei größeren eher im Bereich der Glasmodule ohne Rahmen (ca. 37 g CO₂-Äqu./kWh). Dies liegt vor allem an der fehlenden Möglichkeit zur genaueren Ausrichtung der Module. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Werte für die GFK Module bei gleich optimaler Ausrichtung deutlich niedriger, nämlich im Schnitt um 10 % unter denen der Glasmodule ohne Rahmen liegen.

Zudem zeigen Erfahrungswerte dass die GFK-Module aufgrund des Lichtfalleneffekts, den ihre strukturierte Oberfläche bietet, in ihrer typischen Anwendung - dachparallel und direkt auf die Dachbahn geklebt mit einer Neigung von 3 bis 10° - im Vergleich zu Glasmodulen in gleicher Position und Ausrichtung höhere spezifische Erträge [kWh/kWp], liefern (Rosner, 2021). Dies konnte jedoch mit den aktuell vorhandenen Daten noch nicht in die Berechnungen einfließen.

Auch die Flächenkomponente spielt bei realen Anlagenplanungen eine Rolle. Durch den Wegfall der Verschattung bei geklebten Modulen und damit auch der Reihenabstände, weisen GFK- Systeme eine höhere Leistungsdichte gegenüber Glasmodulen auf der gleichen Grundfläche auf.

Die Auswertung der Nutzwertanalyse zeigt für GFK Module sowohl wegen ihrer Flexibilität als auch aufgrund der Montage durch Verklebung Nutzungsmöglichkeiten, die für unflexible Module und ihre Montagesysteme nicht oder nur schwer nutzbar sind.

Als besonders geeignet wurden folgende Anwendungen identifiziert:

- Fassaden
- Foliendächer
- Leichtbau
- Überdachte Infrastruktur
- Wintergarten
- Überdachte Agrarflächen

Im Folgenden werden ausgewählte Anwendungen die als besonders geeignet identifiziert wurden näher beschrieben.

Fassaden

Die Anbringung von GFK-Modulen auf Fassaden kann klebend ausgeführt werden. Dadurch können die Module einfach auf bestehenden Fassaden nachgerüstet werden. Bei der Montage sind Bohrungen nicht erforderlich, Wärmedämmungen werden nicht beschädigt. Darüber hinaus können die GFK-Module durch die farblichen Gestaltungsmöglichkeiten ästhetischen Ansprüchen, welche auf Fassaden relevanter sind als auf nicht einsehbaren Dächern, gerecht werden.

Das geringe Gewicht der Module erleichtert die Montage. Da die Module an die Fassade geklebt werden, ist keine Hinterlüftung gewährleistet, wodurch Wirkungsgradverluste entstehen.

Foliendächer

Bei Foliendächern, die vor allem für Flachdächer zum Einsatz kommen, sorgt die Kunststoffabdichtungsfolie für die Abdichtung des Daches. Diese Folie soll nicht durchdrungen oder beschädigt werden. Bei der Montage von aufgeständerten Dickschichtmodulen kann die Unterkonstruktion nicht verankert werden und muss durch eine hohe Ballastierung, die sich negativ auf die Klimabilanz auswirkt, befestigt werden. Hierfür muss die Statik des Gebäudes berücksichtigt werden. Die Verklebung durchdringt die Folien nicht. Foliendächer werden zudem unter anderem für Industriedächer genutzt, welche große Flächen für die Anbringung von PV-Modulen bieten.

Leichtbau: Hütten, Container, Scheunen

Bei der Anbringung von Dickschichtmodulen kommt zusätzlich zum Eigengewicht das Gewicht der Unterkonstruktion, also der Befestigungen, der Schienen und der Modulklemmen hinzu, die ein Gewicht von ca. 3 kg/m² ausmachen (Wimplinger 2020). Zusammen mit dem Modul muss mit einem Gewicht von ca. 14 kg/m² gerechnet werden. Das Gesamtgewicht der Anbringung von Dickschichtmodulen ist somit mehr als viermal so hoch wie die Anbringung von geklebten GFK Modulen mit einem Gesamtgewicht von 3,3 kg/m². Flächen mit geringer Belastbarkeit können durch die GFK-Technologie Photovoltaik für die Stromerzeugung nutzen

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz flexibler Module einerseits von Seiten des Materialeinsatzes Vorteile hinsichtlich des Klimapotenzials bietet. Andererseits bieten sich durch Produkteigenschaften und Montageart in jedem Fall zusätzliche, vorher nicht nutzbare Flächen zur Nutzung durch PV an.

5.3. Subtask 3 – Other sustainability topics

Schwerpunkt dieses Subtask waren die Erarbeitung von Band II und III der Risikobetrachtungen „Human health risk assessment methods for PV“.

Der zweite Band betrachtet das Gesundheitsrisiko von PV Modulen bei Beschädigungen und betrachtet dabei z. B. Leaching⁶ bei eintretendem Regenwasser. Betrachtet werden Blei und Cadmium und deren Ausbreitung in unterschiedlichen Umweltkompartimenten.

Ergebnisse und Modelle finden sich hier:

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task_12-Human_Health_Risk_Assessment_Methods_for_PV_part_2.pdf

Der dritte Band zeigt die möglichen Risiken bei Deponierung nach der Lebensdauer. Betrachtet wurden Blei, Cadmium und Selen. Die Ausbreitung in unterschiedliche Umweltkompartimente und damit die Risiken für menschliche Gesundheit wurden modelliert.

Ergebnisse und Modelle finden sich hier:

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/05/PVPS-Task-12_HHRA-PV-Disposal-1.pdf

5.4. Publikationen seit 2018

Jose I. Bilbao, Garvin Heath, Alex Norgren, Marina M. Lunardi, Alberta Carpenter, Richard Corkish, 2021, PV Module Design for Recycling, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-23:2021. ISBN 978-3-907281-27-7.

https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/10/T12_2021_PV-Design-for-Recycling-Guidelines_Report.pdf

M. Raugei, R. Frischknecht, C. Olson, P. Sinha, G. Heath, 2021. Methodological guidelines on Net Energy Analysis of Photovoltaic Electricity, 2nd Edition, IEA-PVPS Task 12, Report T12-20:2021, ISBN 978-3-907281-18-5.

https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/06/IEA_PVPS_Task12_Methodological_Guidelines_NEA_2021_report.pdf

N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, D. Ravikumar. 2021. Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-21:2021. ISBN 978-3-907281-23-9.

⁶ „Leaching“ bezeichnet das Auswaschen von chemischen Verbindungen und Substanzen aus den Komponenten der Module

https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/IEA_PVPS_T12_Preliminary-EnvEcon-Analysis-of-module-reuse_2021_report.pdf

R. Frischknecht, P. Stolz, G. Heath, M. Raugei, P. Sinha, M. de Wild-Scholten, 2020, Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 4th edition, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_Task12_LCA_Guidelines.pdf

R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Raugei, M. Stucki, 2020, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020.
<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>

L. Krebs, R. Frischknecht, P. Stolz, P. Sinha, 2020, Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems, IEA PVPS Task 12, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-17:2020. ISBN 978-3-906042-97-8.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_PVPS_Task12_LCA_PVandStorage.pdf

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-16:2020. ISBN 978-3-906042-96-1.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/05/PVPS-Task-12_HHRA-PV-Disposal-1.pdf

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-15:2019. ISBN 978-3-906042-87-9.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task_12-Human_Health_Risk_Assessment_Methods_for_PV_part_2.pdf

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Für folgende Zielgruppen sind die Ergebnisse interessant bzw. eine Basis für weitere Arbeiten:

- Forschungsinstitute, die sich mit dem Thema Photovoltaik und/oder LCA auseinandersetzen,
- die produzierende Photovoltaik-Industrie, die auf Basis der Ergebnisse Prozessoptimierungen hinsichtlich ihrer Umweltwirkung planen kann,
- Photovoltaikplaner:innen, Anlagen-Errichter:innen, die an der Umweltwirkung ihrer Produkte interessiert sind, bzw. diese kommunizieren wollen,
- die Österreichische Photovoltaik Technologieplattform,
- Photovoltaik Austria,
- Studierende im Fachbereich Energie/Erneuerbare Energie und Lehrende im Fachbereich Photovoltaik und Umweltbewertung,
- die Smart Grid Community, um auch Umwelt und Sicherheitsaspekte berücksichtigen zu können,
- Normungsausschüsse besonders in Bezug auf Sicherheitsaspekte,
- die Gruppe, die mit der Erstellung der PV Roadmap betraut ist, um auch Umweltaspekte mit einbeziehen zu können,
- Verantwortliche im BMK, um die strategische Positionierung im Bereich der Photovoltaik F&E im internationalen Kontext optimal vorbereiten zu können.

Die Einbindung der Zielgruppe erfolgte einerseits über die enge Verknüpfung der österreichischen Vertretung mit der Technologie Plattform und Photovoltaik Austria. Die Disseminierung der Ergebnisse – besonders über Expert:innenaustausch – spielte dabei ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse des Task, sowie darauf basierende methodische Grundlagen der LCA fließen in die Lehre an der FHTW ein und sind auch Gegenstand von Masterthesen oder Spezialisierungen.

6.1. Nutzen der österreichischen Beteiligung am IEA PVPS Task 12

LCAs bilden einen wichtigen Baustein für die Bewertung der Umweltwirkung von PV. Diese Bewertungen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die Harmonisierung von Vorgangsweisen, Inputparametern, Systemgrenzen usw., stellt eine wichtige Grundlage für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien dar.

Die Untersuchungen im Bereich Recycling bieten einen umfassenden Überblick über internationale, rechtliche und technische Lösungsansätze. Das gleiche gilt für die Untersuchungen im Bereich der Sicherheit. Die Mitarbeit Österreichs in IEA PVPS Task 12 bietet die Möglichkeit die Ergebnisse den Zielgruppen zeitnahe vorzustellen und verfügbar zu machen. Anhand beschriebener Best Practice Lösungen ist eine Orientierung für die Erarbeitung von Modellen möglich. Hier können und sollen auch österreichische Lösungsansätze Eingang finden und in Empfehlungen berücksichtigt werden.

Die breite Expertise und Internationalität der Expert:innengruppe ermöglicht es auch formell und informell aktuelle Probleme und Fragestellungen in die Diskussionen einzubringen und verschiedene Blickwinkel für Lösungsansätze zu erfahren. Die Vertretung des Forschungsbereichs Renewable

Energy Systems in mehreren Tasks (1, 12, 15, ExCo) ermöglicht es darüber hinaus unterschiedliche Ergebnisse schnell und eventuell bereits vor ihrer Veröffentlichung zu verknüpfen und Informationen auszutauschen.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Die Arbeit in IEA PVPS stellt in erster Linie die wissenschaftliche Vernetzung österreichischer und internationaler PV Expert:innen dar. Die gewonnenen und geplanten Erkenntnisse sind in den vorangehenden Kapiteln dargestellt.

Die erarbeiteten Erkenntnisse fließen in vielerlei Hinsicht in die weitere Arbeit der Expert:innen ein. Einerseits können auf der Basis des gewonnenen Wissens neue Projekte entwickelt werden, andererseits kann auch das Wissen um noch offene Fragen und aktuelle Probleme neue Ideen zu Projekten anstoßen. Das Wissen fließt überdies in Arbeiten in der Österreichischen Technologieplattform Photovoltaik, anderen Fachgruppen und in die Aus- und Weiterbildung ein. Darüber hinaus dienen die über die Mitarbeit in Task 12 hergestellten Expert:innenkontakte und die dadurch entstandenen persönlichen Expert:innennetzwerke auch dazu, rasch einen Wissenstransfer im PV Bereich sicherzustellen. Besonders das über die EU hinausgehende Netzwerk zu Expert:innen in Japan, China, Korea, Australien und den USA erweitert die üblicherweise auf die EU Forschung konzentrierte Fachexpertise um wesentliche Aspekte.

Im Rahmen des IEA PVPS Task 15⁷ - Acceleration of Building integrated Photovoltaics ist ebenfalls ein Subtask zu Umweltwirkungen enthalten (Subtask D). Der Fokus liegt hier auf der Entwicklung einer standardisierten Methode zur LCA von gebäudeintegrierter Photovoltaik sowie zu Grundlagen des Recyclings. Der österreichische Beitrag adressiert die Verknüpfung der in Task 12 gewonnenen Erkenntnisse mit den Arbeiten in Task 15. Dies geschah über die Mitarbeit von 2 Task 12 Mitgliedern, Susanne Schidler (Österreich, Technikum Wien) und Rolf Frischknecht (Schweiz, treeze), als beratenden Expert:innen.

⁷ <https://iea-pvps.org/research-tasks/enabling-framework-for-the-development-of-bipv/>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kumulierte installierte PV-Leistung in kW _{peak} von 1993 bis 2020 (Biermayr et al., 2020)	10
Abbildung 2: Ein Teil der Expert:innengruppe des IEA PVPS Task 12 bei einem Meeting in Sidney (11/19).....	14
Abbildung 3: Phasen der Ökobilanz nach ISO 14040	16
Abbildung 4: Prozesskette für die Herstellung von GFK Modulen (eigene Darstellung)	17
Abbildung 5: Lagenaufbau des GFK-Moduls (eigene Abbildung)	24
Abbildung 6: Treibhauspotential GFK Modul – Zellproduktion in China.....	26
Abbildung 7: Treibhauspotenzial GFK Modul – Zellproduktion in Europa	27
Abbildung 8: Vergleich der Klimapotenziele von unterschiedlichen Anlagendimensionen und Modultypen	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gewichtung der gewählten Moduleigenschaften für das Anwendungsfeld Mobilität	20
Tabelle 2: Erreichungsgrad der Moduleigenschaften und Ergebnisse für das Anwendungsfeld Mobilität	21
Tabelle 3: Sachbilanz des GFK-Moduls	25

Abkürzungsverzeichnis

a-Si	amorphes Silizium
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CO ₂ -Äqu.	CO ₂ Äquivalent
ETEF	Ethylen-Tetrafluorethylen
EVA	Ethylen-Vinylacetat
GEMIS	Globales Emissionsmodell integrierter Systeme
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Analysis
LCI	Life Cycle Inventory
NEA	Net Energy Analysis
Prepreg	preimpregnated materials

Literaturverzeichnis

AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites, Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Aufl., In: Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013, s.233: <https://link-1springer-1com-100034266016e.han.technikum-wien.at/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-02755-1.pdf> (abgerufen am 28. Juli 2021; 12:34)

Biermayr, P.; Eberl, M.; Enigl, M.; Fechner, H.; Kristöfel, C.; Leonhartsberger, K.; Maringer, F.; Moidl, S.; Schmidl, C.; Strasser, C.; Weiss, W. & Wopienka, E.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2020. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 18/2020. In: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2020: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/marktentwicklung-2020_web.pdf (abgerufen am 03. Dezember 2021, 16:15)

DAS Energy GmbH: GARANTIEBEDINGUNGEN FÜR COMPOSITE MODULE, Version: 2.0, 2017: <https://das-energy.com/storage//Downloads/DAS-Modul-Garantiebedingungen-2-0.pdf> (abgerufen am 20. Juli 2021, 08:56)

Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. 2016 Report IEA-PVPS T12-06:2016, ISBN 978-3-906042-38-1, 2016: http://www.iea-pvps.org/index.php?id=369&eID=dam_frontend_push&docID=3607 (abgerufen am 03. Dezember 2021, 16:48)

Europäisches Parlament: Lieferketten: Unternehmen für Schäden an Mensch und Umwelt verantwortlich. 2021: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20210122IPR96215/lieferketten-unternehmen-fur-schaden-an-mensch-und-umwelt-verantwortlich> (abgerufen am 04. Dezember 2021; 15:35)

European Commission: Carbon Border Adjustment Mechanism. 2021: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3661 (abgerufen am 04. Dezember 2021, 08:45)

Frischknecht, R.; Heath, G., Raugei, M.; Sinha, P.; de Wild-Scholten, M.; Fthenakis, V.; Kim, H.C.; Alsema, E. & Held M.: Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. 3rd edition, IEA PVPS Task 12, International, 2016

Frischknecht, R.; Stolz, P.; Krebs, L.; de Wild-Scholten, M. & Sinha, P.: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems. Report IEA-PVPS T12-19:2020. 2020: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>; (abgerufen am 02. Augustus 2021)

Gerald Hosp: Der anhaltende Knoten in den Lieferketten. In: Neue Zürcher Zeitung, 2021 <https://www.nzz.ch/wirtschaft/der-anhaltende-knoten-in-den-lieferketten-ld.1644664> (abgerufen am 06. Dezember 2021, 13:22)

Google Maps: Transportwege, Google Ireland Limited. 2021: <https://www.google.at/maps> (abgerufen am 19. Oktober 2021, 09:55)

Kaltschmitt, M. & Schebek, L.: Umweltbewertung für Ingenieure. Methoden und Verfahren. In: Springer Verlag, ISBN 978-3-642-36989-6, 2015.

Klöppfer, W. & Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. In: Wiley, Weinheim, 2009.

National Renewable Energy Laboratory (NREL): Crystalline Silicon and Thin Film Photovoltaic Results – Life Cycle Assessment Harmonization. 2015: <https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html> (abgerufen am 02. März 2022, 17:33)

Photovoltaic Austria: PV-Ausrichtung.2021: <https://pvaustria.at/pv-ausrichtung/> (abgerufen am 21. Januar 2021, 14:39)

Rosner, Maximilian: Technische Auskunft (DAS Energy GmbH), 2021.

Schuller, O.; Baitz, M.; Antonin, V.S.; Collet, P. & Sabathier, J.: Attributional vs. Consequential: LCA Methodology Overview, Review and Recommendations with focus on Well-to-Tank and Well-to-Wheel Assessments. In: eucar, 2020: <https://www.eucar.be/wp-content/uploads/2020/08/20200820-EUCAR-Attributional-vs-Consequential-updated-2.pdf> (abgerufen am 02.03.2022, 17:22)

SeaRates: Transportwege, DP World Logistics FZE, 2021: <https://www.searates.com/services/distances-time/> (abgerufen am 19. Oktober 2021)

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 3: Module disposal risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-16:2020. ISBN 978-3-906042-96-1.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/05/PVPS-Task-12_HHRA-PV-Disposal-1.pdf (abgerufen am 22. November 2021, 16:02)

P. Sinha, G. Heath, A. Wade, K. Komoto, 2019, Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-15:2019. ISBN 978-3-906042-87-9.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Task_12-Human_Health_Risk_Assessment_Methods_for_PV_part_2.pdf ((abgerufen am 22. November 2021, 16:02)

Springer Gabler Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Umweltaspekte, 2015:
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/222042/umweltaspekte-v6.html> (abgerufen am 22. November 2021, 14:02)

Weckend, S. & Wade A.: End of Life Solar PV Panels. IEA, IRENA, 2017: http://www.iea-pvps.org/index.php?id=381&eID=dam_frontend_push&docID=3123 (abgerufen am 11. November 2021; 14:19)



**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

bmk.gv.at