

# Carbon Footprint, SPI und Flächenverbrauch von PV-Anlagen und anderen erneuerbaren/fossilen Energieerzeugungssystemen

Manuela Franz<sup>1</sup>, Michael Narodoslawsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme, Gußhausstraße 27-29/E366, 1040 Wien, manuela.franz@tuwien.ac.at

<sup>2</sup> Technische Universität Graz, Institut für Prozess- und Partikeltechnik, Inffeldgasse 13/III, 8010 Graz, narodoslawsky@tugraz.at

**Kurzfassung:** Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen auf Basis erneuerbarer Quellen wird von den lebenszyklusweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen beeinflusst. Dennoch entstehen neue ökologische Fragen, wie der Landverbrauch und Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Stoffen in Abhängigkeit des Herstellungsortes von Kraftwerkskomponenten. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Ökobilanz von Photovoltaikanlagen im Vergleich mit Energieerzeugungssystemen auf Basis anderer erneuerbarer und fossiler Quellen. Die Studie adressiert unterschiedliche Ergebnisse von hochaggregierten und Midpoint-Bewertungsmethoden in der Anwendung an realen lokalen Infrastrukturprojekten. Es wird der Sustainable Process Index (SPI), der Carbon Footprint und die Wirkungskategorie Agricultural Land Occupation eingesetzt. In diesem Zusammenhang werden die zugehörigen Sachbilanzdaten und deren lokale Anwendbarkeit diskutiert. Die Ergebnisse für den SPI und den Carbon Footprint zeigen, dass PV und Biogasanlagen signifikant höhere Umwelteinflüsse haben als andere erneuerbare Energietechnologien. Weiters hängt die Umweltbelastung von PV-Anlagen per erzeugter kWh vorwiegend vom Herstellungsort wegen des unterschiedlichen Strommixes sowie der Technologie und weniger von der Moduleffizienz und dem Betriebsstandort ab. Ein wichtiger Faktor für erneuerbare Energiesysteme ist der Landverbrauch, der mittels der Wirkungskategorie Agricultural Land Occupation bewertet wird. Es zeigt sich, dass Biogasanlagen auf Basis von Maissilage den höchsten direkten Landverbrauch aufweisen, gefolgt von Speicherwasserkraftwerken und Freifeld-Photovoltaikanlagen. Weiters zeigen die Vergleiche verschiedener Bewertungsmethoden, dass keine von ihnen allein ein umfassendes Bild über die Umweltperformance und Hotspots eines Energiesystems darzustellen vermag.

**Keywords:** Graue Energie, PV, erneuerbare Energie, Carbon Footprint, GLO, Agricultural land occupation ALO, Sustainable Process Index SPI, Ökobilanz, LCA

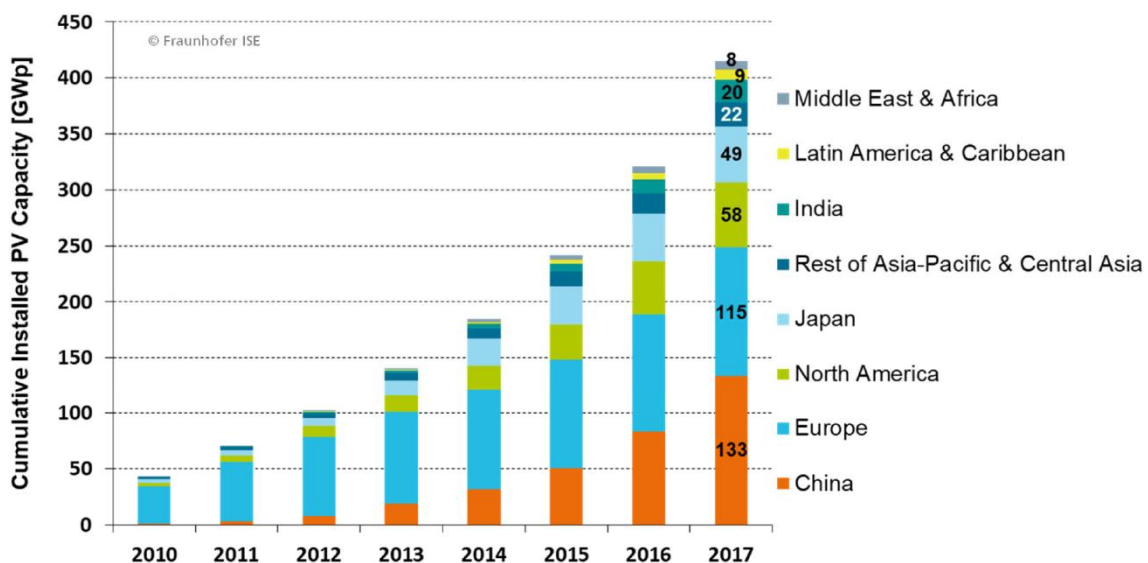
## 1 Einführung

Der Ausbau von Energiesystemen auf Basis erneuerbarer Quellen ist in der europäischen Landschaft vor allem in Form von Windkraftanlagen und PV-Anlagen sichtbar. Das Hauptaugenmerk liegt auf der lokalen Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU Länder, dennoch gibt es weitere ökologische Faktoren, wie der direkte Flächenverbrauch und die Zusammensetzung des Strommixes der Herstellungsländer von Systemkomponenten, die Berücksichtigung finden müssen.

Diese Arbeit zeigt ein differenziertes Bild von Einflüssen auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen von PV-Anlagen, den direkten Landverbrauch und den hochaggregierten Sustainable Process Index im Vergleich zu anderen Energieerzeugungssystemen.

Der *EurObserv'ER* berichtet, dass Ende 2017 in Europa die kumulativ installierte Nennleistung von Photovoltaikanlagen 106,6 GW<sub>p</sub> betrug (EurObserv'er, 2018). Im Jahr 2017 wurden auf globaler Ebene 70 % der PV-Module in China und Taiwan produziert, 15 % in Rest-Asien/Pazifik & Zentralasien und nur 5 % in Europa. Im Bereich der Technologien wurden 95 % in Si-Wafer Technologie, davon 65 % in multikristalliner Technologie, hergestellt, 5 % entfällt auf Dünnschichttechnologie. Verglichen mit dem Jahr 2015 erhöhte sich der globale Herstellungsanteil von monokristallinen Modulen um 32 %. Abbildung 1 zeigt das globale Wachstum der jährlichen PV-Installationen von 2010 bis 2017. (Fraunhofer, 2016/2019)

Im Jahr 2017 war der europäische Gesamtanteil der global installierten PV-Anlagen 28 % mit einem globalen Herstellungsvolumen von nur 5 %. Dies bedeutet unter der Annahme, dass die europäische Herstellung weitgehend für den eigenen Markt geschieht und etwa 5 % aus den USA importiert werden, dass 78 % der kWh-spezifischen Umweltbelastung den Herstellungsbedingungen Chinas und des asiatisch-pazifischen Raumes zuzuordnen sind.



**Abbildung 1.** Jährliche globale kumulative PV-Installation von 2010 bis 2017. (Fraunhofer, 2019)

Es gibt verschiedene Bezugsrahmen, um die Umweltperformance von PV-Modulen zu beschreiben. Die funktionelle Einheit einer Ökobilanz kann pro Modul, per m<sup>2</sup> oder per produzierter kWh über die Gesamtlebensdauer definiert sein.

Aufgrund verschiedener Modultechnologien, länderspezifischer Energiequellen für die Herstellung, hersteller- und technologieabhängiger Moduleffizienzen und ortsabhängiger Globalstrahlung (global horizontal irradiance-GHI) erhält man unterschiedliche Ergebnisse für die Umweltbelastung per produzierter kWh.

Die Umweltbelastung per produzierter kWh kann mittels Midpoint oder hochaggregierter Bewertungsmethoden bestimmt werden. Die Anwendung von Midpoint-Indikatoren ist sinnvoll, wenn spezifische Umweltprobleme im Detail analysiert werden sollen, dies jedoch

auf Kosten eines Gesamtüberblicks der Umweltperformance eines Produktes. Hochaggregierte Umweltindikatoren zeichnen sich dadurch aus, dass eine Gewichtung der bestimmten Charakterisierungsfaktoren vor der Aggregation stattfindet, weshalb diese Methode ein ganzheitlicheres Bild der Umweltbelastungen eines Produktes zeigt (Narodoslawsky & Stoeglehner, 2010). Beide methodischen Ansätze werden in dieser Studie für die untersuchten Energieerzeugungssysteme angewandt.

## 2 Materialien und Methoden

Auf Basis von Literaturdaten wurden zunächst die Umweltcharakteristiken von PV-Modulen auf globaler Ebene ermittelt und danach mit Berechnungen der Umweltparameter für eine lokale PV-Infrastruktur in Eggenburg, Niederösterreich, verglichen. Um die ökologischen Aussagen zwischen Midpoint und hochaggregierten Bewertungsmethoden zu vergleichen, wurden das Treibhausgaspotential (Global Warming Potential-GWP bzw. Carbon Footprint), der Landverbrauch (Agricultural Land Occupation-ALO) und der Sustainable Process Index-SPI der wichtigsten Energieerzeugungssysteme auf Basis fossiler und erneuerbarer Energiequellen ermittelt. Die Funktionelle Einheit ist 1 kWh bereitgestellter elektrischer Energie. Die Midpoint-Wirkungskategorie Global Warming Potential bzw. Carbon Footprint wurde analog zur europäischen Klimastrategie gewählt. Der Landverbrauch wurde gewählt, um die zukünftigen Umweltdrücke und zu erwartende Flächenkonkurrenz erneuerbarer Energien zu bewerten. Der Landverbrauch wurde für Freifeld-PV-Anlagen, Wasserkraftwerke und Biogasanlagen auf Basis von Maissilage für Österreich auf Basis neuer Sachbilanzdaten berechnet.

Die Untersuchungen beinhalten die Aufbereitung und den Vergleich von Literatur- und vorhandenen Sachbilanzdaten sowie eigene Berechnungen. Weiters wurden die verschiedenen Umweltindikatoren auf ihren Informationsgehalt und die Anwendbarkeit auf lokaler Ebene überprüft. In der Literatur werden verschiedene Wirkungskategorien zur Beschreibung des Einflusses auf Klimaänderungen benutzt. Obwohl diese nicht auf identischen Berechnungsmethoden und Aggregationen beruhen, wurden für diese Studie die Kategorien GWP, Climate Change und Carbon Footprint als äquivalent betrachtet, da die treibhausgasrelevanten Emissionen von Energiesystemen während des Herstellungsprozesses der Systemkomponenten fast ausschließlich aus CO<sub>2</sub> bestehen.

Als Hintergrunddaten für die Sachbilanzen der berechneten Kategorien ALO und GWP wurde die ecoinvent-Datenbank Version 3.4 benutzt (Ecoinvent, 2019). Als Bewertungsmethoden wurden ReCiPe Midpoint (H) (Goedkoop, 2013) und der Sustainable Process Index-SPI (Narodoslawsky & Krotscheck, 1995; SPI, 2019) angewandt. Abseits der ökologischen Bewertung von Energiesystemen wird in einem kurzen Abschnitt auf Kennzahlen für die Ermittlung der Energieeffizienz von PV-Anlagen eingegangen.

Die Studie unterteilt sich in folgende Abschnitte:

### *Energetische Amortisationszeit von PV-Systemen*

- Energierückgewinnungszeit – Energy payback time (EPBT)
- Energetischer Erntefaktor – Energy return on energy invested (EROI) factor von PV Modulen
- EROI von Speicherbatterien

### *Midpoint und hochaggregierte Umweltbewertung von Energiesystemen*

- Carbon Footprint von PV-Modulen im nördlichen Niederösterreich
- Vergleich des Carbon Footprint von PV-Modulen, hergestellt in Europa und China
- Carbon Footprint von erneuerbaren und fossilen Energiesystemen
- Sustainable Process Index von erneuerbaren und fossilen Energiesystemen
- Agricultural Land Occupation von erneuerbaren und fossilen Energiesystemen

## **3 Energetische Amortisationszeit von PV-Systemen**

Die energetische Amortisationszeit kann als vereinfachter Bewertungsparameter betrachtet werden. Die Energierückgewinnungszeit (EPBT) gibt an, wieviele Jahre eine PV-Anlage in Betrieb sein muss, bis die eingesetzte "Graue Energie", das ist die Herstellungsenergie, amortisiert ist. Dieser Wert ist abhängig von der Effizienz und dem Aufstellungsort (vgl. Globalstrahlung) der Anlage. Der energetische Erntefaktor (EROI) beschreibt das Verhältnis zwischen der während der Gesamtberiebszeit erzeugten Energie und der investierten Herstellungsenergie. Dieser Faktor ist zusätzlich abhängig von der Lebensdauer der PV-Anlage. Eine Metastudie von Bhandari et al. ermittelte folgende Ergebnisbereiche für PV-Systeme (Bhandari et al., 2015):

- EPBT: 1,0 bis 4,1 Jahre
- EROI Faktor: 8,7 bis 34,2

Die Ergebnisse zeigen für beide Bewertungsmethoden einen Unsicherheitsfaktor bis zum Faktor 4. Um lokale PV-Anlagen aussagekräftig zu bewerten, müssen die EPBT- und EROI-Werte standortangepasst neu berechnet werden. Das Fraunhofer Institut veröffentlichte Referenzwerte für EPBT für Nord- und Südeuropa (Fraunhofer ISE, 2019):

- EPBT für Nordeuropa: 2,5 Jahre
- EPBT für Südeuropa: 1,5 Jahre

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die obigen Ergebnisse keine Auskunft über Treibhausgasemissionen geben, da diese vom jeweiligen lokalen Strommix des Herstellungsortes abhängen, d.h. von der Zusammensetzung der lokal eingesetzten Energieträger wie beispielsweise Kohle, Gas, Wasserkraft oder Nuklearenergie. Weiters werden auch keine anderen Umweltparameter wie Emissionen in Luft, Wasser und Boden berücksichtigt.

Off-grid PV-Systeme benötigen zusätzlich Speicherbatterien. Der österreichische Interessensverband PV Austria gibt folgenden Richtwert für den Energieumsatz für Speicherbatterien an (PV Austria, 2016):

- PV-Speicherbatterien können während ihrer Lebensdauer etwa die 9-fache Energie speichern, wie bei der Herstellung aufgebracht wurde

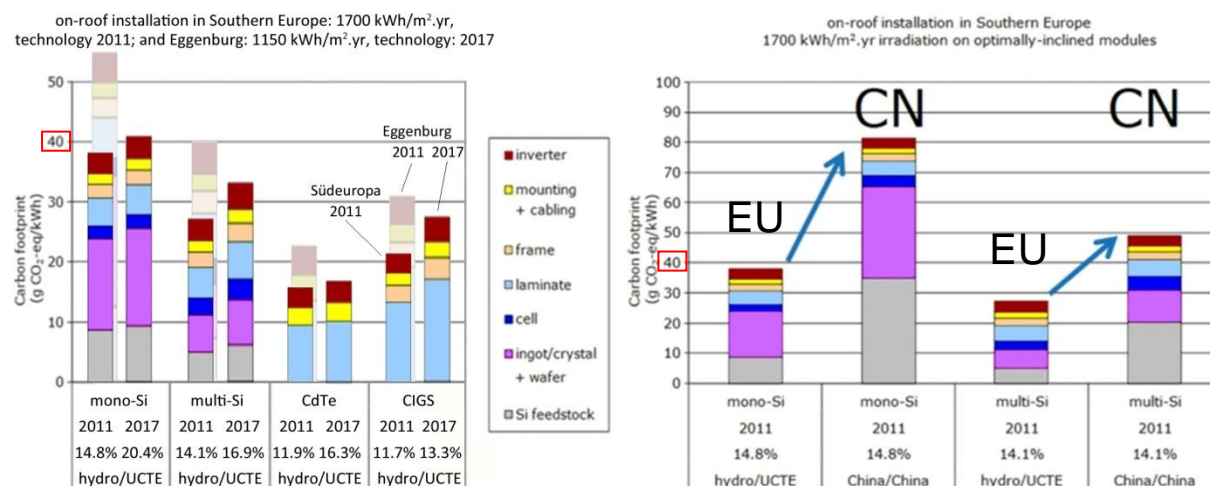
## **4 Midpoint und hochaggregierte Bewertung von Energiesystemen**

### **4.1 Carbon Footprint von PV-Modulen**

Während der Betriebsphase des Lebenszyklus von PV-Anlagen entstehen nahezu keine Treibhausgasemissionen. In einer cradle-to-grave Ökobilanz werden die Emissionen der Herstellung jeder produzierten kWh über die gesamte Nennlebensdauer zugeordnet.

De Wild-Scholten ermittelte den Carbon Footprint per kWh in Abhängigkeit der Modultechnologie, der Werkstoffe und Anlagenteile sowie den Herstellungsorten EU bzw. China und dem Betriebsort Südeuropa mit einer Globalstrahlung von 1700 kWh/m<sup>2</sup>.yr (yr: Jahr) für den Technologiestand 2011, siehe Abbildung 2 (De Wild-Scholten, 2014).

Anhand dieser Literatur wurde untersucht, inwieweit diese Daten für den Carbon Footprint auf den Betriebsstandort Eggenburg, Niederösterreich und auf den Technologiestand 2017 übertragen werden können. Zunächst wird das linke Diagramm der Abbildung 2 erläutert. Die Prozentangaben unter den Balken repräsentieren die durchschnittlichen Moduleffizienzen im entsprechenden Technologiejahr. Die jeweils linken dunklen Balken zeigen die Originalwerte der CO<sub>2</sub>-e Emissionen per kWh für die vier wichtigsten PV Modultechnologien von De Wild-Scholten für das Technologiejahr 2011, den Betriebsort Südeuropa und den Modulherstellungsort Europa. Davon ausgehend wurden als erste Abschätzung mit Hilfe der Gleichung  $Wirkungsgrad = \frac{\text{erzeugte elektrische Energie}}{\text{Globalstrahlung}}$  die Ergebnisse von De Wild-Scholten auf die Gegebenheiten in Eggenburg mit einer niedrigeren Globalstrahlung von 1150 kWh/m<sup>2</sup>.yr und den Effizienzen für das Jahr 2011 und 2017 umgerechnet. Dies geschieht unter der Annahme, dass die jährlichen Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund der Herstellung bei gleicher Modullebensdauer konstant sein müssen. Die zugehörigen Daten für die Globalstrahlung und Moduleffizienzen wurden aus der Literatur übernommen (Franz, 2019; Kap. 6). Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellungsemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von PV-Anlagen in Südeuropa per erzeugter kWh etwa ein Drittel niedriger sind, als in Mitteleuropa am Beispiel von Eggenburg. Dem gegenüber stehen die Unterschiede zwischen den Technologien: Unabhängig von Standort weisen monokristalline PV-Module die höchsten CO<sub>2</sub>-e-Emission auf, multikristalline Module haben etwa ein Viertel weniger und CdTe-Dünnschicht-Module etwa 60 % geringere CO<sub>2</sub>-e Emissionen per erzeugter kWh. Allerdings erzielt man die niedrigeren CO<sub>2</sub>-e Emissionen auf Kosten eines höheren Flächenverbrauchs der Module für die gleiche Energieerzeugung. Für eine ökologische Gesamtbewertung müssten jedoch weitere Wirkungskategorien berücksichtigt werden.



**Abbildung 2.** Carbon Footprint von PV-Modulen per kWh. links: europäische Szenarien, rechts: Herstellung in der EU und in China. (Quelle: De Wild-Scholten, 2014; modifiziert)

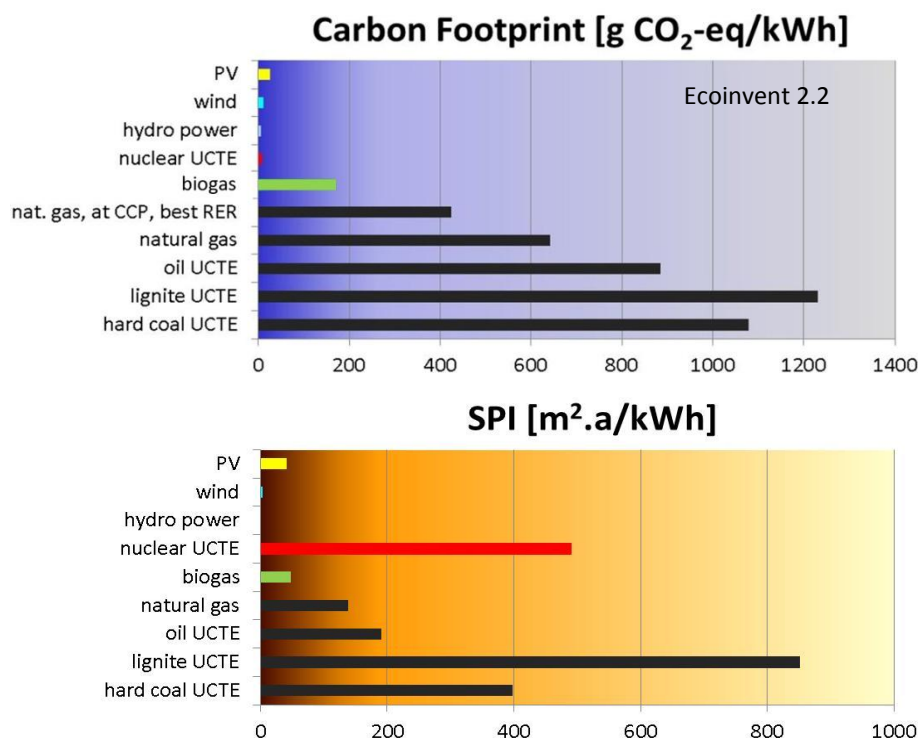
Es ist anzumerken, dass das europäische Szenario in Abbildung 2 davon ausgeht, dass die Siliziumherstellung (grau) mit Wasserkraft als Energiequelle berechnet wird (De Wild-Scholten, 2014), was nicht für den gesamten Sektor gelten kann. Die Wafer-, Zellen- und Modulherstellung wird mit dem durchschnittlichen EU-Energiemix UCTE berechnet.

Das rechte Diagramm in Abbildung 2 zeigt den Vergleich des Herstellungsaufwands zwischen europäischen und chinesischen Produktionsstandorten (De Wild–Scholten, 2014). Die Ergebnisse zeigen, dass die Modulproduktion in China den Carbon Footprint oder "embedded carbon" per kWh etwa verdoppelt bei gleicher Effizienz und Globalstrahlung.

Insgesamt bedeutet dies, dass neben dem Betriebsstandort vor allem die gewählte Technologie und der Herstellungsort der PV–Systemkomponenten mit dem zugehörigen Strommix wichtige Faktoren für die CO<sub>2</sub>–e Emissionen einer PV–Anlage darstellen. Eine Verdoppelung der Emissionen, abhängig davon, ob ein Modul in Europa oder China hergestellt wird, darf in ökologischen und ökonomischen Kaufentscheidungen nicht außer Acht gelassen werden. Dieser Umstand sollte in zukünftiger Umweltpolitik mehr Beachtung finden.

#### 4.2 Carbon Footprint und SPI verschiedener Energieerzeugungssysteme, EU

Treibhausgasemissionen beziehen sich nur auf eine von vielen Wirkungskategorien. Um die Umweltperformance eines Produktes zu beschreiben, sollten weitere Umweltauswirkungen berücksichtigt werden. Hochaggregierte Indikatoren gewichten verschiedenste Wirkungskategorien auf systematische Weise bereits vor der Aggregation. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich des Carbon Footprint mit dem hochaggregierten Sustainable Process Index (SPI) per produzierter kWh für elektrische Energiesysteme auf Basis erneuerbarer und fossiler Quellen (Datenquellen: De Wild–Scholten, 2014; Narodoslowsky & Krotscheck, 1995; SPI, 2019). UCTE repräsentiert eine Berechnungsmethode für den durchschnittlichen europäischen Strommix. Im Falle des Biogas wurde der Carbon Footprint auf Basis von ecoinvent 3.3 neu berechnet und hinzugefügt, die anderen Datenquellen beziehen sich auf die ältere Version ecoinvent 2.2 (De Wild–Scholten, 2014; Ecoinvent, 2019).



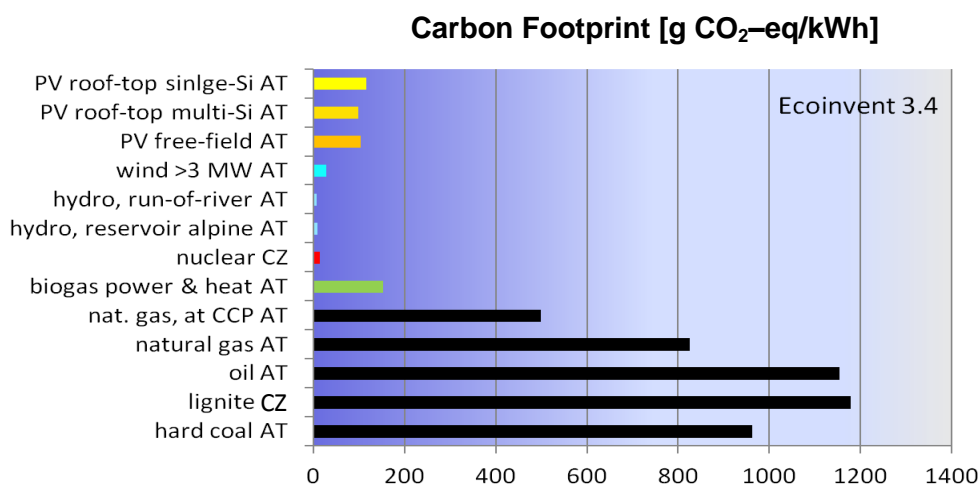
**Abbildung 3.** Vergleich des Carbon Footprint (De Wild–Scholten, 2014; modifiziert) und des SPI (eigene Berechnung) per kWh verschiedener Energiequellen; durchschnittliche EU Daten.

Beide Bewertungsmethoden zeigen, dass alle erneuerbaren Energiequellen signifikant niedrigere Umweltbelastungen aufweisen als fossile Quellen, die Verhältnisse untereinander sind jedoch unterschiedlich. In der Gruppe der erneuerbaren Energiequellen zeigen beide Methoden, dass Wasserkraft gefolgt von Windenergie die niedrigsten Umweltbelastungen aufweisen. Im Falle des Carbon Footprint emittieren PV-Systeme doppelt soviel CO<sub>2</sub>-eq und Biogasanlagen 15x soviel als Windkraftwerke.

Die hochaggregierte Methode des SPI zeigt, dass PV-Systeme und Biogasanlagen ähnliche Umweltdrücke erzeugen, welche etwa 10x höher als Windkraft sind. Die Ergebnisse zeigen weiters, dass die Berücksichtigung nur von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zu einseitig ist. Die größten Unterschiede zwischen CO<sub>2</sub>-eq und SPI ergeben sich in den Relationen zu Kernkraft und Braunkohle. Der SPI zeigt, dass Braunkohle einen eindeutigen Umwelt-Hot-Spot darstellt, gefolgt von Kernkraft und Steinkohle. Besonders hervorzuheben ist der Umweltdruck von Kernkraftwerken, welcher im Carbon Footprint nicht sichtbar ist.

### 4.3 Carbon Footprint verschiedener Energieerzeugungssysteme, Österreich

Die Anwendung eines Midpoint-Bewertungsportfolios führt zur Schwierigkeit, welche Wirkungskategorien herangezogen und wie sie gegenüber anderen gewichtet werden sollen. Nachfolgend werden zwei sehr unterschiedliche Midpoint-Wirkungskategorien für obige Energiequellen auf lokaler Ebene für Österreich (AT) gegenübergestellt. Der Carbon Footprint und in Abschnitt 4.4 der Landverbrauch Agricultural Land Occupation (ALO) wurden auf Basis von ecoinvent 3.4 berechnet. Im Falle von PV-Systemen wurden mono- und multi-Si Systeme verglichen sowie der Unterschied zwischen Aufdach- und Freifeld-PV-Anlagen. Abbildung 4 zeigt die Resultate für den Carbon Footprint aller wichtigen Energiesysteme. Nachdem Österreich keine Kernkraftwerke und in naher Zukunft auch keine Kohlekraftwerke mehr besitzt (Steinkohle ist in der Datenbankversion noch verfügbar), werden als Ersatzdaten diejenigen aus Tschechien (CZ) verwendet, was durch den Energiehandel gerechtfertigt erscheint.



**Abbildung 4.** Vergleich des Carbon Footprint von Energiesystemen. Durchschnitt AT; CCP: combined cycle power plant (eigene Berechnung; Datenquelle: ecoinvent 3.4).

Die Ergebnisse zeigen, dass die österreichischen Verhältnisse auf Basis von ecoinvent 3.4 ähnlich denen auf europäischer Ebene sind (basierend auf ecoinvent 2.2, siehe Abbildung 3), jedoch sind nahezu alle Werte höher. Im Bereich der erneuerbaren Energien sind die CO<sub>2</sub>-eq Emissionen von PV-Anlagen 5x höher, von Windkraftwerken 2,5x höher und von

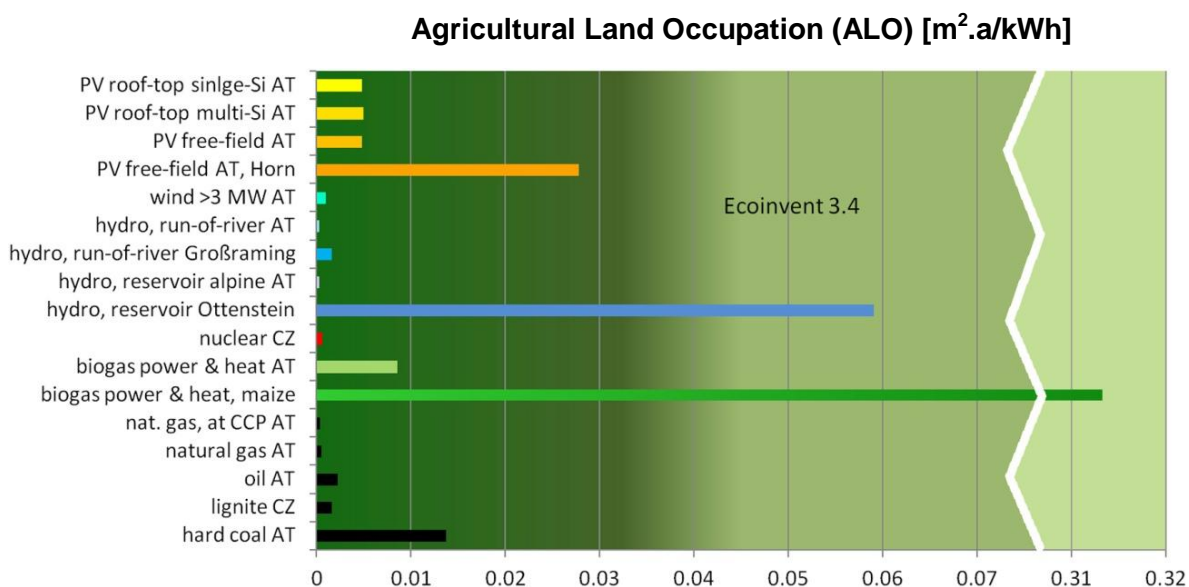


Biogasanlagen um 10 % niedriger im Vergleich mit dem EU–Durchschnitt in Abbildung 3. Der neu ermittelte Wert von Biogas ist in power & heat aufgeteilt, wobei die Effizienzanteile 0,37 % für elektrische Energie und 0,53 % für Wärme angenommen wird. Innerhalb der PV–Gruppe emittieren monokristalline Module 18 % mehr CO<sub>2</sub>–eq als multikristalline Module, da der Energieverbrauch für die Herstellung der Si–Ingots und Wafer monokristalliner Zellen höher ist. Im Bereich der fossilen Energiequellen zeigen Erdgas und Erdöl signifikant höhere Werte für den Carbon Footprints als das europäische Mittel gemäß ecoinvent 2.2.

Dennoch kann aufgrund dieser Vergleiche nicht eindeutig gesagt werden, ob der österreichische Markt bzw. dessen Technologien unterschiedlich zum EU–Mittel sind und/oder im Allgemeinen die Sachbilanzdaten der Version ecoinvent 3.4 zum Teil nach oben korrigiert wurden. Der europäische Energiemix UCTE ist in der ecoinvent Datenbank 3.4 nicht mehr verfügbar. Um dies zu klären müssten aufwändige Vergleiche und Neuberechnungen durchgeführt werden. Jedenfalls ist Vorsicht geboten, wenn Neuberechnungen von Ökobilanzen mit Literaturdaten verglichen werden.

#### 4.4 Landverbrauch verschiedener Energieerzeugungssysteme, Österreich

Der Landverbrauch bzw. Agricultural Land Occupation (ALO) ist ein wesentlicher Umweltindikator für erneuerbare Energien, da zu erwarten ist, dass es zunehmend Landnutzungskonflikte zwischen Infrastruktur und Siedlungen, Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Energieerzeugung, chemische und textile Rohmaterialien sowie die Erhaltung von natürlichen Habitaten geben wird. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich des Landverbrauchs per kWh von Energiesystemen auf Basis erneuerbarer und fossiler Quellen für Österreich, basieren auf Sachbilanzdaten von ecoinvent 3.4. Analog zu Abschnitt 4.3 wurden wiederum tschechische Ersatzdaten für Kernkraft und Braunkohle angenommen.



**Abbildung 5.** Vergleich des Landverbrauchs verschiedener Energiesysteme; durchschnittliche Daten für Österreich und neue Fallstudien. (Eigene Berechnung; Datenquelle für AT, CZ: Ecoinvent 3.4).

Für vier Technologien wurden neue Vergleichsdaten für Österreich berechnet, nämlich für Freifeld–PV–Anlagen, Laufkraftwerke, Speicherkraftwerke und Biogasanlagen auf Basis von Maissilage. Aus den ersten drei PV–Werten in Abbildung 5 ist erkennbar, dass der direkte



jährliche Verbrauch an landwirtschaftlichen Flächen in der Betriebsphase in seiner realen Auswirkung bei Freifeld-Anlagen in der ecoinvent-Datenbank nicht berücksichtigt ist. Deshalb wurde eine Neuberechnung am Beispiel der Freifeld-Anlage in Horn, Niederösterreich, durchgeführt.

Abbildung 6 zeigt eine Satellitenaufnahme der Freifeld-PV-Anlage in Horn mit gelb markierter Umrandung entlang des Zauns (Google Earth, 2019). Die korrespondierenden Anlagendaten sind folgende: Die installierte Leistung der Anlage ist  $850 \text{ MW}_p$  (NÖN, 2014), die eingezäunte Fläche, gemessen in Google Earth, beträgt  $21900 \text{ m}^2$  und die durchschnittliche jährliche Energieproduktion ist mit  $1,119 \text{ kWh/W}_p$  angenommen (vgl. Franz, 2019; Kap. 6). Die sich daraus ergebende zusätzliche jährlich besetzte Landfläche beträgt  $0,023 \text{ m}^2 \cdot \text{a/kWh}$ .



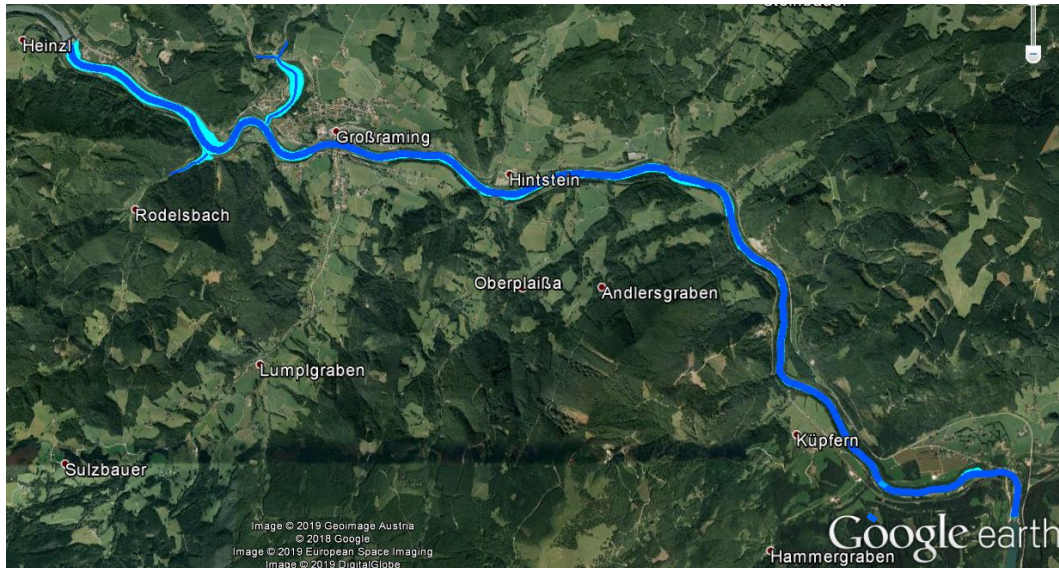
**Abbildung 6.** Freifeld-PV-Anlage in Horn, Niederösterreich.

(Eigene Bearbeitung; Quelle: Google Earth, 2019; Bildaufnahmedatum: 8/15/2017)

Im Zuge einer genauen Analyse der Sachbilanzdaten anderer Energiesysteme stellte sich heraus, dass der landwirtschaftliche Flächenverbrauch während der Betriebsphase ebenfalls nicht berücksichtigt ist. In den Datensätzen sind zwar Flächenangaben vorhanden, diese gehen jedoch nicht in die Wirkungskategorie ALO ein, deshalb wurden weitere Fallstudien durchgeführt. Im Fall von Laufwasserkraftwerken zeigt der Beitragsbaum der originalen Flächenresultate der Wirkungskategorie ALO (siehe Abbildung 5: hydro, run-of-river AT), dass 64,1 % des Flächenverbrauchs der Produktion von getrocknetem Schnittholz und 8,71 % der Stahlproduktion im Rahmen der Bauphase zugeordnet sind.

Die neu berechneten Werte wurden einerseits am Beispiel eines Laufkraftwerks mittlerer Größe in Großraming an der Enns, Oberösterreich, durchgeführt. Abbildung 7 zeigt eine Satellitenaufnahme der Region Nationalpark Kalkalpen, wobei der Flusslauf der Enns zwischen den Kraftwerken Weyer und Großraming hervorgehoben ist. Die Länge des Rückstaubeckens beträgt 13,2 km und wurde in Google Earth gemessen. Das Rückstaubecken ist hellblau eingefärbt und darin der "originale" Fluss mit einer geschätzten Breite von 60 m in dunkelblau. Der zusätzliche Landverbrauch ( $A_{ALO}$ ) wurde über die Messung der Fläche des Rückstaubeckens ( $A_{reservoir}$ ) in Google Earth minus der geschätzten originalen Flussoberfläche ( $A_{river}$ ) ohne Kraftwerk ermittelt:  $A_{ALO} = A_{reservoir} - A_{river} = 1,17 \text{ km}^2 - 0,81 \text{ km}^2 = 0,36 \text{ km}^2$ . Die jährliche Produktion von elektrischer Energie im Kraftwerk Großraming

beträgt 270,7 GWh (Verbund, 2019). Daraus ergibt sich ein zusätzlicher jährlicher Landverbrauch während des Betriebs von  $0,0013 \text{ m}^2/\text{kWh}$ . In diesem Fall ist der direkte Landverbrauch per kWh während der Betriebsphase 8x höher als der Wert von ecoinvent 3.4.



**Abbildung 7.** Laufwasserkraftwerk in Großraming, Niederösterreich.

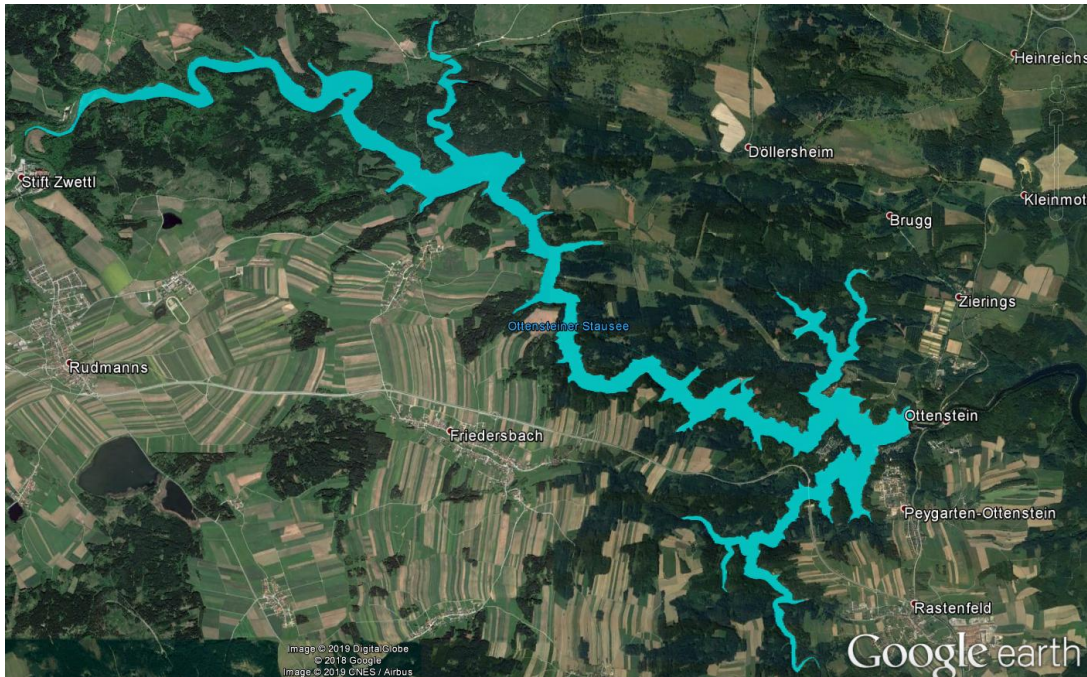
Hellblau: Rückstaubecken, dunkelblau: originale Flussbreite (Eigene Bearbeitung;  
Quelle: Google Earth, 2019; Bildaufnahmedatum: 1/1/2000)

Andererseits wurden Werte für das Speicherkraftwerk Ottenstein, Niederösterreich, ermittelt. Die Datensatzdokumentation von ecoinvent 3.4 definiert einen durchschnittlichen Flächenverbrauch für das Speicherbecken von  $0,00345 \text{ m}^2 \cdot \text{a}$  per produzierter kWh (Ecoinvent, 2019). Dieser Wert ist zwar im Datensatz als Elementarfluss angeführt, jedoch nicht in den Ergebnissen der Wirkungskategorie ALO enthalten, der sich zu einem Ergebniswert von  $0,00012 \text{ m}^2 \cdot \text{a}$  per kWh berechnet. Die Gründe für die Nichtberücksichtigung der Speicherfläche sind unklar. Eine Begründung wäre, dass sich der Datensatz auf alpine Regionen ohne landwirtschaftliche Nutzung bezieht. Der Beitragsbaum der originalen Flächenresultate der Wirkungskategorie ALO (siehe Abbildung 5: hydro, reservoir alpine AT) zeigt, dass 32 % des Flächenverbrauchs der Stahlproduktion, 20 % dem elektrischen Energieverbrauch vor Ort, 15,2 % der Zementproduktion und 12,6 % dem Transport und der Behandlung von Stahlbetonabfällen im Rahmen der Bauphase zugeordnet sind.

Das untersuchte Speicherkraftwerk Ottenstein befindet sich in der Region Waldviertel Mitte in Niederösterreich. Abbildung 8 zeigt eine Satelitenaufnahme der Region mit dem hellblau markierten Speicherbecken. Das Becken hat eine Länge von 9,7 km und eine Oberfläche von  $4,3 \text{ km}^2$  (Land NÖ, 2017). Die verlorene nutzbare Fläche für Land- und Forstwirtschaft ist größer als die Oberfläche des Sees, dessen maximale Tiefe 69 m beträgt, da die Neigung des Geländes vom Ufer zur Seemitte miteinbezogen werden müsste. Nachdem keine genaueren Daten dazu verfügbar waren, wurde dieser Aspekt nicht weiter berücksichtigt. Die jährliche Erzeugung elektrischer Energie wird mit durchschnittlich 72,4 GWh/a angenommen (Schlager et al., 2011). Der neu errechnete Landverbrauch ALO beträgt  $0,059 \text{ m}^2/\text{kWh}$ . Dieses Ergebnis ist 500x höher als der Wert von ecoinvent 3.4. Allerdings muss dazu angeführt werden, dass Speicherkraftwerke immer höhere Flächenverbrauchswerte als Laufkraftwerke aufweisen, da sie für die Spitzenlastabdeckung und Laufkraftwerke für die



Grundlastversorgung vorgesehen sind. Das rückgestaute Wasser von Laufkraftwerken wird schneller "abgearbeitet". Der benötigte kWh-spezifische Flächenverbrauch des Speichers bzw. Rückhaltebeckens besitzt unter anderem einen signifikanten zeitabhängigen Faktor.



**Abbildung 8.** Staubecken des Speicherkraftwerks Ottenstein, Niederösterreich.  
Hellblau: Speicherbecken. (Eigene Bearbeitung; Quelle: Google Earth, 2019;  
Bildaufnahmedatum: 8/15/2017)

Die vierte Neuberechnung des Flächenbedarfs betrifft Biogasanlagen. In ecoinvent 3.4 (biogas power & heat AT, siehe Abbildung 5) wird als Energierohstoff eine Mischung von organischen Reststoffen wie Bioabfall, Klärschlamm, Mist oder gebrauchtes Speiseöl angenommen. Diese Abfälle gehen ohne Landverbrauch und Emissionen in den Datensatz ein, da diese der vorherigen Nutzung zugeordnet sind. Eine Vielzahl existierender Biogasanlagen werden jedoch mit speziell dafür angebauten Pflanzen betrieben. Deshalb wurde ein Vergleichswert für den Flächenverbrauch auf Basis von Maissilage, welche den höchsten Energieertrag im Vergleich zu Getreide und Grassilage aufweist, neu berechnet (biogas power & heat, maize, siehe Abbildung 5). Die Neuberechnung des ALO wurde mittels folgender Parameter durchgeführt: In Österreich beträgt die durchschnittliche Maisernte (Grünmasse) 47 t/ha (Resch et al., 2009). Der Masseverlust von Grünmasse zu Maissilage beträgt 10 % (BayLfU, 2007). Um 1 m<sup>3</sup> Biogas zu produzieren, sind 5,71 kg Maissilage nötig. Nach Literaturdaten teilt sich die Energieerzeugung per m<sup>3</sup> Biogas in 2,74 kWh thermische Energie (64 %) und 1,57 kWh elektrische Energie (36 %) (Hutňan, 2015). Unter Berücksichtigung dieser Parameter und der Allokation zwischen power & heat ergibt sich die benötigte Fläche für die Produktion von 1 kWh elektrischer Energie auf Maisbasis zu 0,313 m<sup>2</sup>.a.

Der Vollständigkeit halber soll hier erwähnt werden, dass auch bei Windkraftanlagen der direkte Landverbrauch in der Betriebsphase in ecoinvent 3.4 nicht berücksichtigt ist. Eine Neuberechnung beinhaltet einige Schwierigkeiten, da die benötigte Grundfläche relativ klein ist und prinzipiell Landwirtschaft in der nächsten Umgebung bis auf die Zufahrtswege betrieben werden kann und wird. Dennoch ergeben sich andere Beschränkungen wie beispielsweise für Besiedelungen, Viehzucht und insbesondere Käfighaltung, sowie Störung

der Habitate von Wildtieren und Vögel aufgrund von Lärmbelastigung, Infraschall, Schlagschatten, Eiswurf oder direkter Flügelschlag. In der Arbeit von Dumke wird der direkte Landverbrauch von 7,5 MW Windkraftanlagen mit 500 m<sup>2</sup> angegeben. Weiters wird der Landverbrauch von Windparks über die gesamt umgebende Fläche aller Einzelanlagen definiert (Dumke, 2017).

Ein Vergleich der Gesamtergebnisse der Landverbräuche von Energieerzeugungssystemen auf Basis erneuerbarer und fossiler Energiequellen mit dem Carbon Footprint zeigt genau umgekehrte Verhältnisse. Die neu berechneten Biogasanlagen, Speicherkraftwerke und Freifeld-PV-Anlagen weisen einen hohen Landverbrauch auf. Alle anderen PV-Systeme und Biogasanlagen, die mit Abfällen betrieben werden, weisen ebenfalls einen signifikant höheren Flächenbedarf als fossile Energiequellen auf. Laufwasserkraftwerke zeigen die beste Umweltperformance im Bereich der erneuerbaren Energiequellen. Windkraftanlagen sind zwar wegen der unklaren Berechnungsmethode des Flächenverbrauchs nicht neu berechnet, dennoch ist zu erwarten, dass der Wert weitaus höher als in Abbildung 5 angegeben ist. Mit Ausnahme von Steinkohle zeigen alle fossilen Energieträger einen sehr kleinen Flächenverbrauch per produzierter kWh. Allerdings müsste beim Bergbau nicht nur die Fläche beispielsweise für den Tagebau, sondern auch die durch Wasserverlust, Staubentwicklung etc. beeinträchtigte Umgebungsfläche berücksichtigt werden. Die Verhältnisse des ALO für PV und Biogasanlagen sollten ein Indikator für zukünftige Umweltdrücke und Landnutzungskonflikte durch den zu erwarteten verstärkten Ausbau sein.

Ein Vergleich des ALO mit dem SPI zeigen deutlich die unterschiedlichen Aussagen der Ergebnisse, obwohl sie die gleiche Einheit besitzen. Sie demonstrieren den Unterschied zwischen einer Midpoint und hochaggregierten Bewertungsmethode. Der ALO einer Aufdachanlage ist etwa 10000x kleiner und der von Erdöl etwa 80000x kleiner als die Ergebnisse des SPI.

## 5 Schlussfolgerungen

Diese Studie untersuchte den Informationsgehalt und die Vergleichbarkeit von Umweltparametern von PV-Systemen und anderen erneuerbaren und fossilen Energieerzeugungssystemen mittels Energiebilanzen sowie Midpoint und hochaggregierten Bewertungsmethoden. Im Detail wurden die energetische Amortisationszeit, der Carbon Footprint, der Sustainable Process Index und der Landverbrauch ermittelt und verglichen.

Der Carbon Footprint von PV-Anlagen hängt sehr stark von der verwendeten Technologie und dem Herstellungsort ab. CdTe-Module emittieren ein um 2 bis 2,5 weniger CO<sub>2</sub>-e als Si-basierte Module, jedoch auf Kosten eines signifikant höheren Flächenverbrauchs. Eine Steigerung der Moduleffizienz und der Ort des Betriebs in Nord- oder Südeuropa weisen einen kleineren Einfluss auf den Carbon Footprint per kWh auf als der Herstellungsort. Eine nahezu Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-eq Emissionen, je nachdem, ob ein Modul in Europa oder China hergestellt wird, sollte in der Energiepolitik und bei ökonomischen Kaufentscheidungen Berücksichtigung finden.

Ein Vergleich der erneuerbaren Energien in Österreich zeigt, dass der Carbon Footprint von PV-Systemen und Biogasanlagen um die Faktoren 4,3 bzw. 5,7 höher sind als bei Windkraftwerken und bis zu 35x höher als bei Wasserkraftwerken. Der Vergleich zwischen den ecoinvent Datenbanken der Versionen 2.2 und 3.4 zeigt, dass bei nahezu allen

Energiequellen die Sachbilanzdaten nach oben korrigiert wurden und dies bei Vergleichsstudien berücksichtigt werden muss. Im Falle von Speicherkraftwerken sollten die Treibhausgasemissionen der durch die Flutung absterbenden Pflanzen, Organismen und Sedimente ermittelt und mitberücksichtigt werden (Kemenes et al., 2007; Delsontro et al., 2010; Deemer et al., 2016).

Die Ergebnisse des hochaggregierten SPI zeigen vergleichbare Trends wie der Carbon Footprint, jedoch ist der Umweltdruck von PV-Systemen und Biogasanlagen 10x höher als Windkraft. Weiters können Kernkraft- und Braunkohlekraftwerke als Umwelthotspots erkannt werden.

Die Midpoint Wirkungskategorie Agricultural Land Occupation zeigt ein konträres Bild der Umweltsituation aller Energiequellen. Biogasanlagen auf Basis von Maissilage, Speicherkraftwerke und Freifeld-PV-Anlagen weisen einen sehr hohen Flächenverbrauch per kWh im Vergleich zu den anderen Technologien auf. Alle anderen PV-Systeme und Biogasanlagen auf Abfallbasis haben ebenfalls große Flächenverbräuche im Vergleich zu fossilen Kraftwerken. Der SPI als hochaggregierter Nachhaltigkeitsindikator beinhaltet auch den Umweltdruck des direkten Flächenverbrauchs in Form des Teilfußabdrucks "Footprint for direct area use and installations". Jedoch ist dieser Wert vergleichsweise niedrig verglichen mit dem Gesamtfußabdruck und muss separat visualisiert werden.

Die Ergebnisse der verschiedenen Bewertungsmethoden zeigen, dass keiner der Indikatoren alleine ein umfassendes Bild der Umweltperformance der verschiedenen Energiesysteme zu visualisieren vermag. Neben der Klimarelevanz, die durch CO<sub>2</sub>-Äquivalente ausgedrückt wird, und dem Ziel, toxische Emissionen und den Einsatz fossiler Ressourcen zu reduzieren, deren Umweltdrücke zusätzlich über den SPI sichtbar werden, spielt der direkte Landverbrauch in der Betriebsphase zukünftig eine große ökologische Rolle. Während gefährliche Emissionen zumindest theoretisch durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle gehalten werden können, birgt die massive Steigerung des Landverbrauchs für Energiesysteme auf Basis erneuerbarer Quellen neue ökologische und raumplanerische Herausforderungen in sich.

## 6 Referenzen

- BayLfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007). Biogashandbuch Bayern – Materialienband; Kap. 1.7, Kap. 2.2.3, Stand Mai 2007. [https://energypedia.info/images/6/65/Biogashandbuch\\_Bayern.pdf](https://energypedia.info/images/6/65/Biogashandbuch_Bayern.pdf) [04/2019].
- Bhandari, Khagendra P.; Collier, Jennifer M.; Ellingson, Randy J.; Apul, Defne S. (2015). Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 133-141. [http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/PDF/pubs/life\\_cycle\\_assesment\\_ellingson\\_apul\\_\(2015\)\\_ren\\_and\\_sustain.\\_energy\\_revs.pdf](http://astro1.panet.utoledo.edu/~relling2/PDF/pubs/life_cycle_assesment_ellingson_apul_(2015)_ren_and_sustain._energy_revs.pdf) [14.9.2017].
- De Wild-Scholten (2014). Environmental aspects of photovoltaics. Smart Green Scans. Presentation at the 12. Österreichische Photovoltaik-Tagung Linz, Austria, 4 Nov. 2014. <http://smartgreen-scans.nl/publications/deWildScholten-2014-Environmental-aspects-of-PV.pdf> [10.1.2017].
- Deemer, Bridget R.; Harrison, John A.; Li, Siyue; Beaulieu, Jake J.; Delsontro, Tonya; Barros, Nathan; Bezerra-Neto, José F.; Powers, Stephen M.; Dos Santos, Marco A.; Vonk, Arie (2016). Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience Advance Access published October 5, 2016*. DOI: 10.1093/biosci/biw117.

- Delsontro, Tonya; McGinnis, Daniel F.; Sobek, Sebastian; Ostrovsky, Ilia; Wehrli, Bernhard (2010). Extreme Methane Emissions from a Swiss Hydropower Reservoir: Contribution from Bubbling Sediments. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, pp. 2419–2425.
- Dumke, Hartmut (2017). Erneuerbare Energien für Regionen - Flächenbedarfe und Flächenkonkurrenzen. Dissertation, TU Wien, 2017. Online: <https://repositum.tuwien.ac.at/> [04/2019].
- Ecoinvent (2019). <http://www.ecoinvent.org/> [21.12.2019].
- Eurobserv'er (2018). Photovoltaic Barometer 2018. <http://www.eurobserv-er.org> [03/2019].
- Franz, Manuela (2019). Environmental Assessment of New Electrical and Electronic Appliances and Energy Supply Systems. Dissertation, TU Wien, 2019, 240 Seiten.
- Fraunhofer ISE (2016). Photovoltaics Report, updated: 17 November 2016. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf> [7.1.2017].
- Fraunhofer ISE (2019). Photovoltaics Report, updated: 14 March 2019. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/photovoltaics-report.html> [03/2019].
- Goedkoop, Mark; Heijungs, Reinout; Huijbregts, Mark; De Schryver, An; Struijs, Jaap; van Zelm, Rosalie (2013): ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First Edition (revised). Ruimte en Milieu. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2013.
- Google Earth (2019). <https://www.google.com/earth/> [12/2019].
- Hutřan, Miroslav (2015). Maize Silage as Substrate for Biogas Production. *Intech open*, 2015 pp. 173-196. <http://dx.doi.org/10.5772/64378> [04/2019].
- Kemenes, A.; B. R. Forsberg; and J. M. Melack (2007). Methane release below a tropical hydroelectric dam, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12809, doi:10.1029/2007GL029479.
- Land NÖ (2017). Statistisches Handbuch des Landes Niederösterreich. 41. Jahrgang 2017. NÖ Schriften 215 – Information. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2017.
- Narodoslawsky M.; Krotscheck C.; (1995). The sustainable process index (SPI): Evaluating processes according to environmental compatibility; *J. of Hazardous Materials*, 1995, 41 (2+3), 383-397.
- Narodoslawsky, Michael; Stoeglehner, Gernot (2010). Planning for Local and Regional Energy Strategies with the Ecological Footprint. *Journal of Environmental Policy & Planning* Vol. 12, No. 4, December 2010, 363–379.
- NÖN (2014). Horn: Photovoltaik-Anlage versorgt 250 Haushalte. *Niederösterreichische Nachrichten NÖN*, online Article 30. December 2014 (09:56). <https://www.noen.at/horn/horn-photovoltaik-anlage-versorgt-250-haushalte-top-4305900#> [1.4.2019].
- PV Austria (2016). PHOTOVOLTAIC AUSTRIA Federal Association. Stromspeicher. <https://www.pvaustria.at/pv-speicher/>. (German) [1.4.2019].
- Resch, Reinhard; Wiedner, Günther; Tiefenthaller, Franz; Stromberger, Wolfgang; Frank, Peter; Meusburger, Christian (2009). Abschlussbericht Silageprojekt, Wissenschaftliche Tätigkeit Nr. 3561 (100535); Qualitätsbewertung von österreichischen Grassilagen und Silomais aus Praxisbetrieben. Evaluation of Austrian grass- and maize silage. Lehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irnding des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft.
- Schlager, Otmar; Brandner-Weiß, Renate; Lunzer, Horst; Sturm, Ansbert; Weltzl, Adolf; Brandner, Gottfried; Müllner, Markus; Müller, Silke (2011). Umsetzungskonzept für die Klima- und Energiemodellregion Kampseen. Energieagentur der Regionen (EAR) im Auftrag der Klima- und Energiemodellregion Kampseen. Waidhofen an der Thaya, 2011.
- SPI (2019). Sustainable Process Index. <http://spionweb.tugraz.at/> [12/2019].
- Verbund AG (2019). Kraftwerke. <https://www.verbund.com/de-at/ueber-verbund/kraftwerke> [04/2019].