

LANDNUTZUNG VON PV-FREIFLÄCHENANLAGEN

Manuela Franz

TU Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme, Gußhausstraße 27-29/E366, 1040 Wien,
manuela.franz@tuwien.ac.at

Kurzfassung: In dieser Studie wurde der Landverbrauch von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in der Betriebsphase in fünf am dichtesten bebauten Regionen in der Europäischen Union untersucht. Darüber hinaus wurde der Anteil an der Gesamtfläche der jeweiligen Region bestimmt. Insgesamt wurden 1380 PV-Freiflächenanlagen mittels einer Geoinformationssystem-Software kartiert. Der regionale Gesamtflächenanteil beträgt 0,14 % in Südmähren (CZ), 0,15 % in Niederbayern (DE) bzw. 0,21 % westlich des Bayrischen Waldes, 0,26 % in der Grafschaft Cornwall (UK), 0,51 % in der Region Lecce (IT) und 0,56 % in der Gemeinde Abdera (GR). Die durchschnittliche umzäunte Fläche einer PV-Anlage (Medianwert) beträgt 2,4 Hektar in der Provinz Lecce, 1,9 Hektar in Niederbayern und 0,7 Hektar in der Gemeinde Abdera. In Niederbayern sind 51 % der PV-Freiflächenanlagen mit einem Flächenanteil von 34 % der Gesamtanlagenfläche neben Bahn- und Autobahntrassen installiert. Um eine überregionale nachhaltige Energie- und Raumplanung zu unterstützen, sollten Energietechnik, Raumplanung und Technikfolgenabschätzung interdisziplinär zusammengeführt werden. Aus Sicht einer effizienten Flächennutzung ist die Wahl der Modultechnologie der höchsten Effizienzklasse empfohlen. Standorte für PV-Freiflächenanlagen sollten sich auf bereits versiegelte Flächen, Altlasten, entlang von Autobahnen oder ähnlichen Orten beschränken, um landwirtschaftlich nutzbaren Boden zu schützen.

Keywords: Photovoltaik, PV, land use, Landverbrauch, Flächenbedarf

1 Einführung

Der Übergang zur Energieerzeugung auf Basis erneuerbarer Quellen rückt die Betrachtung der Leistungsdichte der Energieträger und der dazugehörigen Technologien in einen neuen Blickwinkel. Die Leistungsdichte gibt an, wieviel Energie pro Fläche und Zeit einer Anlage umgewandelt werden kann. Die Leistungsdichten von erneuerbaren Energieströmen weisen um einige Größenordnungen niedrigere Werte auf als die von fossilen Brennstoffen (Smil, 2016). Daraus folgt ein sich verändernder, weitaus höherer Flächenbedarf für die Energieumwandlung insbesondere mittels Freiflächen-Photovoltaik-(PV)-Anlagen mit einer mittleren Leistungsdichte von $6,6 \text{ W}_e/\text{m}^2$ und Biomasse-Kraftwerken mit einer mittleren Leistungsdichte von nur $0,08 \text{ W}_e/\text{m}^2$ (Van Zalk & Behrens, 2018; Index "e": Anteil elektrische Leistung). Während beispielsweise im Umfeld von Windkraftanlagen weitestgehend eine Mehrfachnutzung in Form von Landwirtschaft betrieben werden kann, ist dies bei konventionellen Freiflächen PV-Anlagen nicht möglich bzw. nicht rentabel.

Durch den Ausbau erneuerbarer Energien entsteht eine zunehmende Konkurrenz mit der Nahrungs-, Holz- und Futtermittelproduktion, der Produktion von Rohstoffen für die chemische und textile Industrie, Siedlungen und Infrastruktur sowie mit der Erhaltung

natürlicher Habitats. Sowohl die Errichtung der Kraftwerke – betreffend den Flächenbedarf für die Rohstoffgewinnung und Produktion – als auch der jährliche Betrieb zeigen zum Teil einen signifikant höheren Landverbrauch pro erzeugter kWh als Kraftwerke mit fossilen Energieträgern (Ecoinvent, 2017; Franz & Narodoslawsky, 2020). Allerdings werden bei konventionellen Stromerzeugungstechnologien sekundäre Auswirkungen auf die Landnutzung, wie Verschmutzung und Störung der angrenzenden Ökosysteme in der Regel nicht berücksichtigt (Fthenakis & Kim, 2009). Durch die Erschließung erneuerbarer Energiequellen kommt es jedenfalls zu einer geografischen Verschiebung der besetzten Fläche.

Die Bewertung der Landnutzung oder des Landverbrauchs kann über Wirkungskategorien einer Ökobilanz durchgeführt werden, wie z.B. die Kategorie „Agricultural land occupation“ der Bewertungsmethode ReCiPe (Hauschild & Huijbregts, 2015), die auf eine erzeugte kWh während der Lebensdauer der Anlage bezogen ist. Hierbei ergeben sich jedoch einige Unsicherheiten. Einerseits ist die Bezugsgröße der erzeugten kWh abhängig von der Lebensdauer, der Technologie und der Effizienz eines Moduls. Andererseits unterscheidet man bei der Landnutzung eine einmalige Landtransformation und eine dauerhafte Besetzung von Land sowohl für die Betriebszeit als auch für die Dauer der Rückführung des Bodens in seinen ursprünglichen Zustand (Koellner et al., 2013). Die oftmals angewandte Kategorie der einmaligen Landtransformation ergibt über die gesamte Lebensdauer des Kraftwerks einen weitaus niedrigeren Wert pro erzeugter kWh als die jährliche Berücksichtigung der besetzten Flächen während des Betriebs. Überdies wird in der Ecoinvent-Datenbank (v.3.4) für Ökobilanzen nur die Landnutzung für die Rohstoffproduktion für Baustoffe und Anlagen berücksichtigt, jedoch nicht die Flächenbesetzung während des jährlichen laufenden Betriebs (Ecoinvent, 2017), was für die Bewertung und den Vergleich der momentanen Flächenverfügbarkeit nicht ausreichend ist.

Die Nutzung von Ackerland für Energiezwecke führt überregional gesehen zu zusätzlichen CO₂-Emissionen, da in anderen Regionen Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand, wie z.B. Naturwälder, für den globalen Nahrungsmittelbedarf gerodet werden (Nonhebel, 2005). Für je 100 Hektar Solarflächen in der EU werden 31 bis 43 Hektar nicht bewirtschafteter Wald in der ganzen Welt gerodet. Je nachdem wie das Land vor der Errichtung einer PV-Anlage genutzt wurde und wie es während des Betriebs bewirtschaftet wird, kann es zu einer Nettofreisetzung oder -aufnahme von Kohlenstoff kommen (Van de Ven et al., 2021). Weiters können Ökosysteme und biologische Vielfalt durch Versiegelung und Veränderung der Habitats empfindlich gestört werden (Gasparatos et al., 2017). In der Literatur wurde eine Vielzahl an Ökobilanzen für PV-Anlagen durchgeführt, die jedoch in der Regel die Folgen der Landnutzungsänderung nicht berücksichtigen. Je nach Bewirtschaftung der Fläche unter den Solarpanelen erhöhen sich die ermittelten CO₂-Emissionen dieser Ökobilanzstudien um 10 bis 150% (Van de Ven et al., 2021).

In den letzten Jahren wurden einige systematische Untersuchungen über den Bestand und Flächenbedarf europäischer PV-Freiflächenanlagen mit unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen durchgeführt. Nach dem Ausbauhöhepunkt in Italien wurde in einer Studie von 2014 ermittelt, dass durchschnittlich 0,1% der italienischen landwirtschaftlichen Fläche für PV-Anlagen genutzt sind (Squatrito et al., 2014). Italien ist nach wie vor das Land mit der höchsten Dichte an PV-Freiflächenanlagen in Europa, wie aus einer Studie von 2020 hervorgeht, in der die Standorte von über 17000 PV-Freiflächenanlagen Europas kartiert und visualisiert wurden (Franz & Piringer, 2020). Eine Detailstudie über die Provinz Lecce im

Südosten Italiens ermittelte 475 PV-Freiflächenanlagen auf Basis von crowdsourcing-Daten von Open Street Map mit einen Gesamtflächenbedarf von 13,3 km² und untersuchte die Veränderungen der örtlichen Landnutzung (Mauro & Lughi, 2017). Darüber hinaus evaluierte eine rumänische Studie von 2019 die Standorte von 110 PV-Freiflächenanlagen in der Rumänischen Tiefebene und untersuchte den Anteil an den wichtigsten Landnutzungs-/Bodenbedeckungskategorien und Bodentypen, sowie die Entfernung der PV-Anlagen zu Wäldern, Gewässern oder Schutzgebieten (Vrinceanu et al., 2019).

In einer Gesamtabstschätzung auf europäischer Ebene berechnete eine Studie von 2017, dass die (damalige) EU-27 durchschnittlich 7,5% der gesamten Landesflächen benötigen würde, um den Bedarf an elektrischer Energie (von Stand 2009) mit Solarenergie zu decken. Dies entspricht knapp 50% des verfügbaren Landes, das nicht bereits für menschliche Aktivitäten genutzt wird (Capellán-Pérez et al., 2017).

Im Vergleich zu Dachanlagen erzeugen Freiflächen-PV-Anlagen eine zusätzliche Flächenversiegelung und haben einen erheblich höheren Flächenbedarf. Abbildung 1 zeigt Beispiele für die Ausführung von PV-Freiflächenanlagen. Unter Berücksichtigung von Wartungs- und Zufahrtswegen sowie der Verhinderung der Beschattung von benachbarten Modulreihen beträgt der Flächenbedarf etwa das 2,5-fache der Module (Turney & Fthenakis, 2011).



Abbildung 1: Screenshots unterschiedlicher Formationen von PV-Freiflächenanlagen in der EU (Quelle: Google Earth, 2022; eigene Bearbeitung).

Neben dem zum Teil bereits untersuchten Flächenbedarf in Italien zeigen weitere Regionen in Europa eine hohe Bebauungsdichte von PV-Freiflächenanlagen (Franz & Piringer, 2020). Ziel dieser Studie ist die Flächenkartierung und Darstellung von bestehenden Freiflächen-PV-Anlagen in dicht bebauten Regionen Europas. Mittels der erhobenen Daten werden die Größenverhältnisse gegenübergestellt sowie die durchschnittliche PV-Anlagengrößen und der Anteil an der Gesamtfläche der jeweiligen Region ermittelt.

2 Methode

Es wurden unterschiedliche Gebiete in Europa ausgewählt, die nach den Ergebnissen der Kartierungen von (Franz & Piringer, 2020) eine auffallend hohe Bebauungsdichte an PV-Freiflächenanlagen in einer geografischen Region gemäß der Europäischen NUTS-Systematik aufweisen. Hierbei war die Anzahl der Anlagen von Bedeutung, nicht aber die Flächen, da diese nicht erfasst sind. Insofern könnten Regionen übersehen worden sein, die eventuell eine größere Anzahl an Großanlagen, die beispielsweise auf ehemaligem Militärgelände wie im Osten Deutschlands, errichtet sind. Die Begrenzung auf NUTS-Regionen wurde deshalb gewählt, da diesen eindeutige Flächendaten der Europäischen

Statistik Eurostat (Europäische Kommission, 2022) zugewiesen sind. Folgende Gebiete wurden näher untersucht:

- Provinz Lecce im Südosten Italiens
- Niederbayern im Süden Deutschlands
- Südmähren in Tschechien
- Grafschaft Cornwall im Südwesten Englands
- Gemeinde Abdera im Regionalbezirk Xanthi der westgriechischen Region Ostmakedonien und Thrakien

Die letzte, griechische Gemeinde ist keine NUTS-Region. Sie wurde dennoch miteinbezogen, da die hohe Bebauungsdichte hervorgestochen ist und Gemeindegrenzen und dazugehörige Flächendaten ermittelt werden konnten.

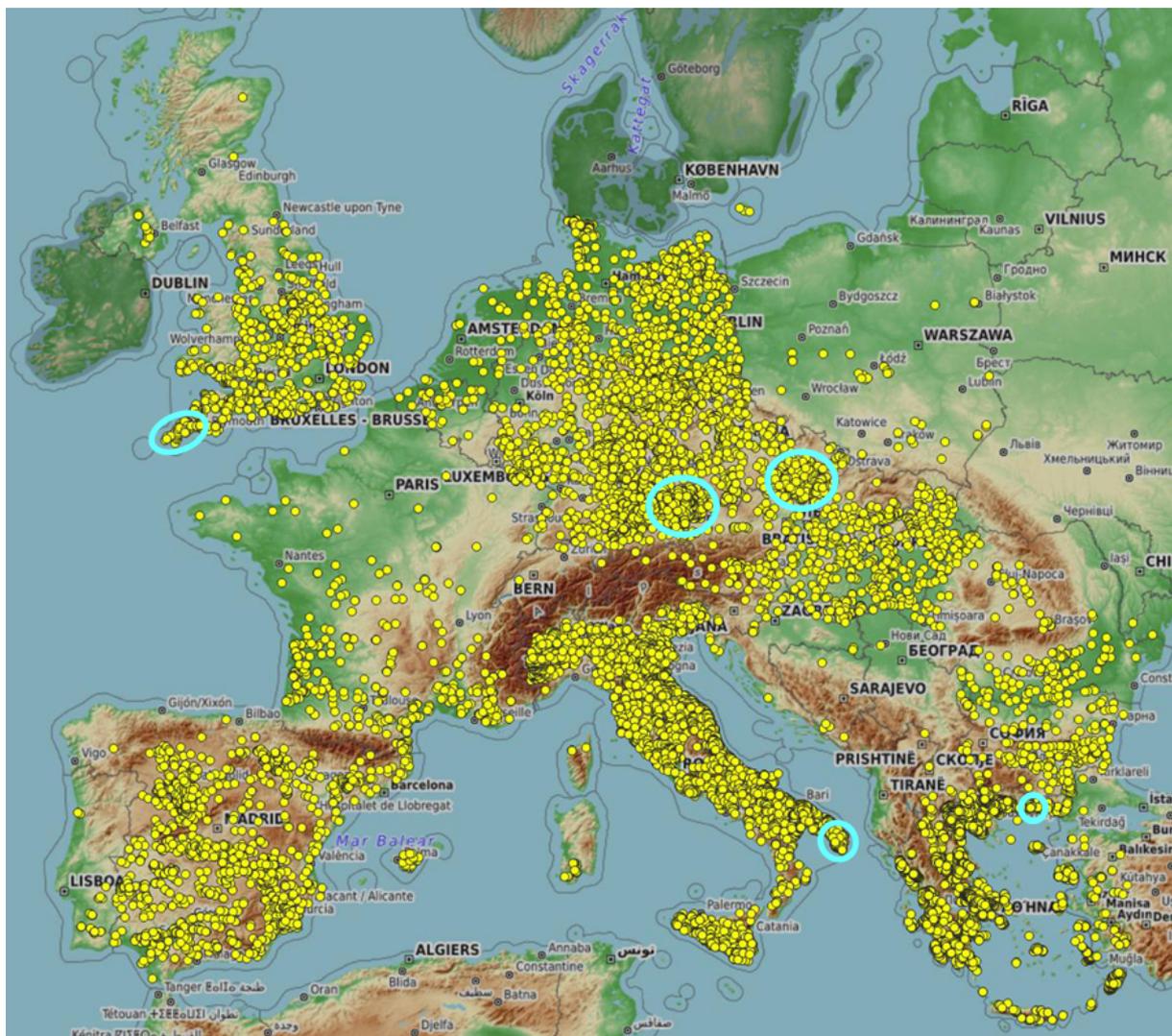


Abbildung 2: Ausgewählte Regionen mit dicht bebauten PV-Freiflächenanlagen in der EU (blau) (Bildquelle: Franz & Piring, 2020: 17000 kartierte PV-Freiflächenanlagen).

In diesen fünf Gebieten wurden alle visuell aufgefundenen PV-Freiflächenanlagen in Google Earth Pro manuell in einem GIS-Format kartiert. Der Stand der Satellitenaufnahmen war Großteils das Jahr 2020. Es wurden die umzäunten Flächen, deren Begrenzungen in den Satellitenaufnahmen gut sichtbar sind, je Anlage erfasst und die jeweils ermittelten

Flächendaten direkt aus Google Earth in ein Excel-File übertragen. Die direkte mit PV-Modulen bebaute Fläche innerhalb der Umzäunung wurde aufgrund des hohen Aufwands vorerst nicht zusätzlich ausgewiesen. PV-Anlagen auf Gewächshäusern oder ähnlichen Mehrfachnutzungen wurden nicht berücksichtigt. Auffällige örtliche Gegebenheiten wie Autobahntrassen oder Steinbrüche wurden mitdokumentiert.

Die Kartierung erfolgte systematisch in einem Raster entweder von Nord nach Süd oder von West nach Ost. Daraus ergibt sich eine zufällige Nummerierung und Verteilung der Anlagen. Die Ergebnisgrafiken in Abbildung 3 stellen somit auch eine statistische räumliche Verteilung der Anlagengrößen dar. Große PV-Freiflächenanlagen bestehen manchmal aus nebeneinanderliegenden vollständig umzäunten Gebieten, wodurch nicht klar ist, ob es sich um eine oder mehrere Anlagen handelt. Diese Anlagen wurden je nach räumlichen Gegebenheiten in der Umgebung unterschiedlich gezählt und stellen somit einen Unsicherheitsfaktor in der Größe der Anlage dar.

Für die statistische Auswertung der Anlagengrößen wurde eine deskriptive Zusammenfassung der Lagemaße, Streuungsmaße und Formparameter für jede Region durchgeführt sowie die Dichtefunktion der Normalverteilung vergleichend ermittelt. Weiters wurde der Gesamtflächenanteil der PV-Freiflächenanlagen jeder Region berechnet. Die jeweiligen Flächenangaben der Region wurden von Eurostat ([Europäische Kommission, 2022](#)) entnommen.

Die GIS-Flächendaten von Google Earth wurden in die freie Geoinformationssoftware QGIS ([QGIS, 2022](#)) importiert und daraus als visuelle Darstellung Regionalkarten über die Größe und Verteilung der PV-Freiflächenanlagen erstellt.

3 Ergebnisse

Es wurden insgesamt 1380 PV-Freiflächenanlagen mit dem Umfang der jeweiligen Umzäunung in fünf europäischen Regionen kartiert. Tabelle 1 zeigt die Gesamtergebnisse der Regionen mit der jeweiligen Anzahl und Gesamtfläche der PV-Freiflächenanlagen, die Fläche der Region, den Anteil an der Regionsfläche und die mittlere umzäunte Fläche je PV-Anlage.

Tabelle 1: Ergebnisse und Gesamtauswertung der kartierten PV-Freiflächenanlagen.

	Anzahl der Anlagen	Summe umzäunte PV-Fläche [km ²]	Fläche Region [km ²]	Anteil umzäunte PV-Flächen an der Gesamtfläche der Region [%]	Durchschnittliche Anlagengröße Medianwert [ha]
Grafschaft Cornwall (UK)	115	9,1	3546	0,26	7,7
Niederbayern (DE)	499	15,2	10326	0,15 (ohne Bayrischer Wald: 0,21)	1,9
Südmähren (CZ)	221	9,7	7197	0,14	2,9
Provinz Lecce (IT)	468	14,2	2759	0,51	2,4
Municipality of Abdera (GR)	77	1,8	315	0,56	0,7

3.1 Statistische Auswertung der kartierten Flächen der PV-Anlagen

Die statistische Verteilung der Anlagengrößen aller untersuchten Regionen ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Regionen der verschiedenen Länder zeigen unterschiedliche Größenverteilungen der installierten Anlagen. In der Provinz Lecce zeigt sich, abzüglich von 5 % an Großanlagen, ein relativ konstanter Bodenverbrauch mit einer durchschnittlichen umzäunten Fläche von 2,4 ha pro Anlage.

Die Anlagengrößen in Niederbayern sind etwas mehr gestreut: Unter Ausschluss der Anlagen über 5 ha, das entspricht 15 % der Anlagen, ist die durchschnittliche Größe einer PV-Freiflächenanlage 1,9 ha pro Anlage, also etwas kleiner als in Italien. Griechenland besitzt auffällig viele kleinere PV-Anlagen: 62 % der Anlagen haben eine Fläche von < 1 ha. In Südmähren und Cornwall kann kein vergleichbarer Trend für eine Flächengröße festgestellt werden. Cornwall hat die breiteste Größenverteilung der PV-Anlagen von 0,5 ha bis 20 ha.

Die größte PV-Anlage hat eine Fläche von 54 ha in Cornwall nördlich des Bodmin Moors, gefolgt von 46 ha in Südmähren nahe Brünn und einer Anlage in Niederbayern mit 40 ha. Die größte Anlage in Lecce hat eine Fläche von 37 ha. Insgesamt haben 1,2 % der PV-Anlagen je eine Fläche > 20 ha. Der Anteil der PV-Freiflächenanlagen an der Gesamtfläche der Region variiert zwischen 0,14 % in Südmähren und 0,56 % in der Region Abdera. Letztere bedeutet, dass etwa jeder 200ste m² Regionsfläche mit einer PV-Anlage besetzt ist.

In Niederbayern kann man zusätzlich unterscheiden zwischen dem Gebiet des Bayerischen Waldes und dem restlichen Land. Zieht man die Fläche vom Bayerischen Wald, in dem eine geringe Anzahl an PV-Anlagen installiert ist, ab, erhöht sich der Flächenanteil auf 0,21 %. In Cornwall sind 0,26 % der Landesfläche mit PV-Anlagen besetzt.

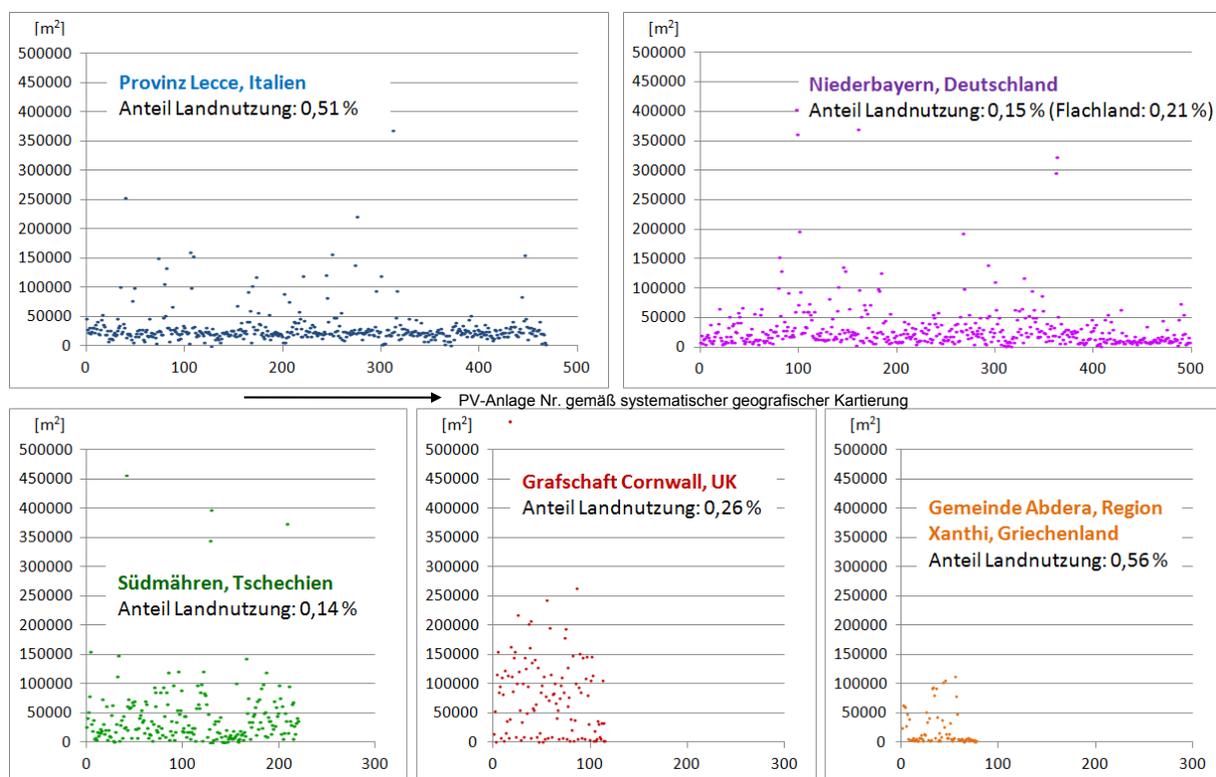


Abbildung 3: Vergleich von Größe, Verteilung und Bebauungsdichte aller kartierten PV-Freiflächenanlagen innerhalb der untersuchten Regionen (eigene Bearbeitung).

Die Punkte für die PV-Anlagen in Abbildung 3 sind in der Reihenfolge der Kartierung aufgetragen, welche systematisch entweder von Nord nach Süd oder West nach Ost durchgeführt wurde. Die Verteilung der Flächengrößen stellen somit auch die räumliche Verteilung in den Regionen dar: es zeigen sich keine signifikant abweichenden lokalen Häufungen von bestimmten Anlagengrößen innerhalb einer Region.

Tabelle 2 zeigt vergleichend eine detaillierte statistische Auswertung der umzäunten Flächen aller PV-Anlagen und Regionen.

Tabelle 2: Statistische Auswertung der umzäunten Flächengrößen der PV-Freiflächenanlagen aller untersuchten Regionen (eigene Bearbeitung).

	Lecce (IT)	Niederbayern (DE)	Südmähren (CZ)	Cornwall (UK)	Abdera (GR)
Mittelwert μ [ha]	3,0	3,0	4,4	7,9	2,3
Median [ha]	2,4	1,9	2,9	7,7	0,7
Standardabweichung σ [ha]	3,1	4,1	5,7	7,6	3,0
Kurtosis	41	39	25	11	2
Schiefe	5,4	5,5	4,4	2,2	1,7
Minimum [m ²]	218	1749	52	579	1195
Maximum [ha]	37	40	46	54	11
Anzahl der PV-Anlagen $\sum x_i$	468	499	221	115	77

Abbildung 4 zeigt die grafische Darstellung der Dichtefunktion der Normalverteilung der umzäunten Flächen x_i aller kartierten PV-Freiflächenanlagen. Auf der Abszisse sind die jeweiligen Datenpunkte x_i nach der Größe der Fläche geordnet aufgetragen, die je nach Region gemäß Tabelle 2 eine unterschiedliche Anzahl haben und auf 1 normiert sind. Die Werte der Datenpunkte $f(x_i, \mu, \sigma)$ für die Dichtefunktion der Normalverteilung wurden folgendermaßen berechnet:

$$f(x_i, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

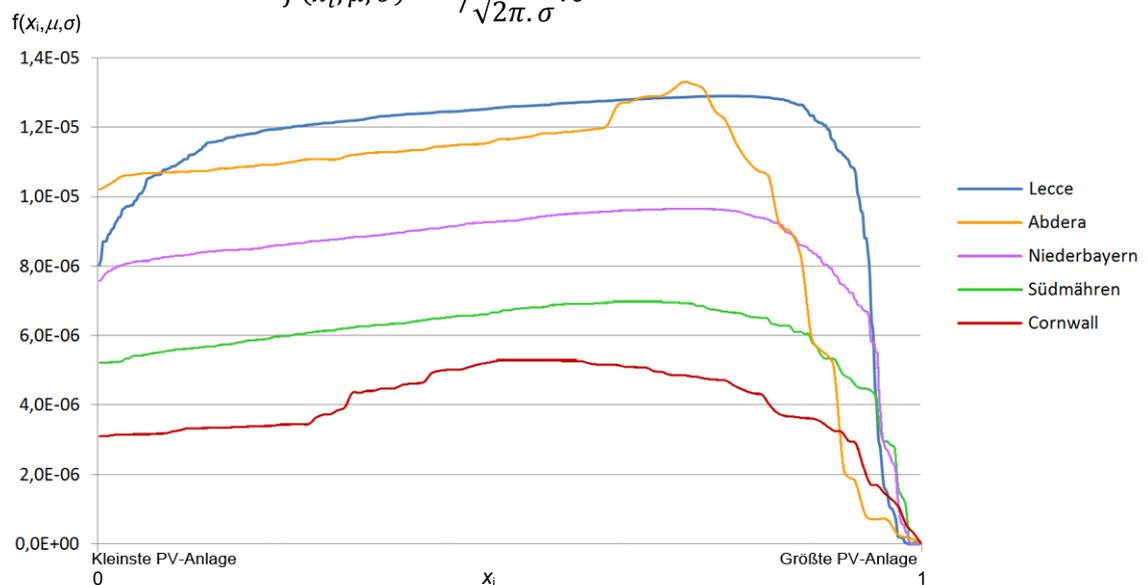


Abbildung 4: Dichtefunktion der Normalverteilung, Vergleich der kartierten PV-Anlagengrößen nach Region (eigene Bearbeitung).

Die Größen der PV-Anlagen in Cornwall (rote Kurve) sind links und rechts des Mittelwerts, das ist jeweils die höchste Stelle der Kurve, relativ gleichmäßig verteilt. In allen anderen Regionen ist die Mehrzahl der PV-Anlagen kleiner als der Mittelwert. Je höher die Kurve insgesamt liegt, desto inhomogener ist die Gesamtgrößenverteilung der PV-Anlagen. Das heißt in diesem Fall, es gibt wenige sehr große Anlagen im Vergleich zum Mittelwert. Flache Kurvenabschnitte zeigen eine große Anzahl von PV-Anlagen in ähnlicher Größe.

3.2 Visualisierte Darstellung der kartierten PV-Freiflächenanlagen

Die folgenden Kartenausschnitte in den Abbildungen 5-9 zeigen die Ergebnisse aller untersuchten Regionen. Die rosa gefärbten Flächen entsprechen den kartierten umzäunten PV-Freiflächenanlagen. Die dargestellten Flächen sind wegen der Strickstärke des Polygons real geringfügig kleiner. In jeder Abbildung ist die zugehörige Bezeichnung der NUTS-Region angegeben.

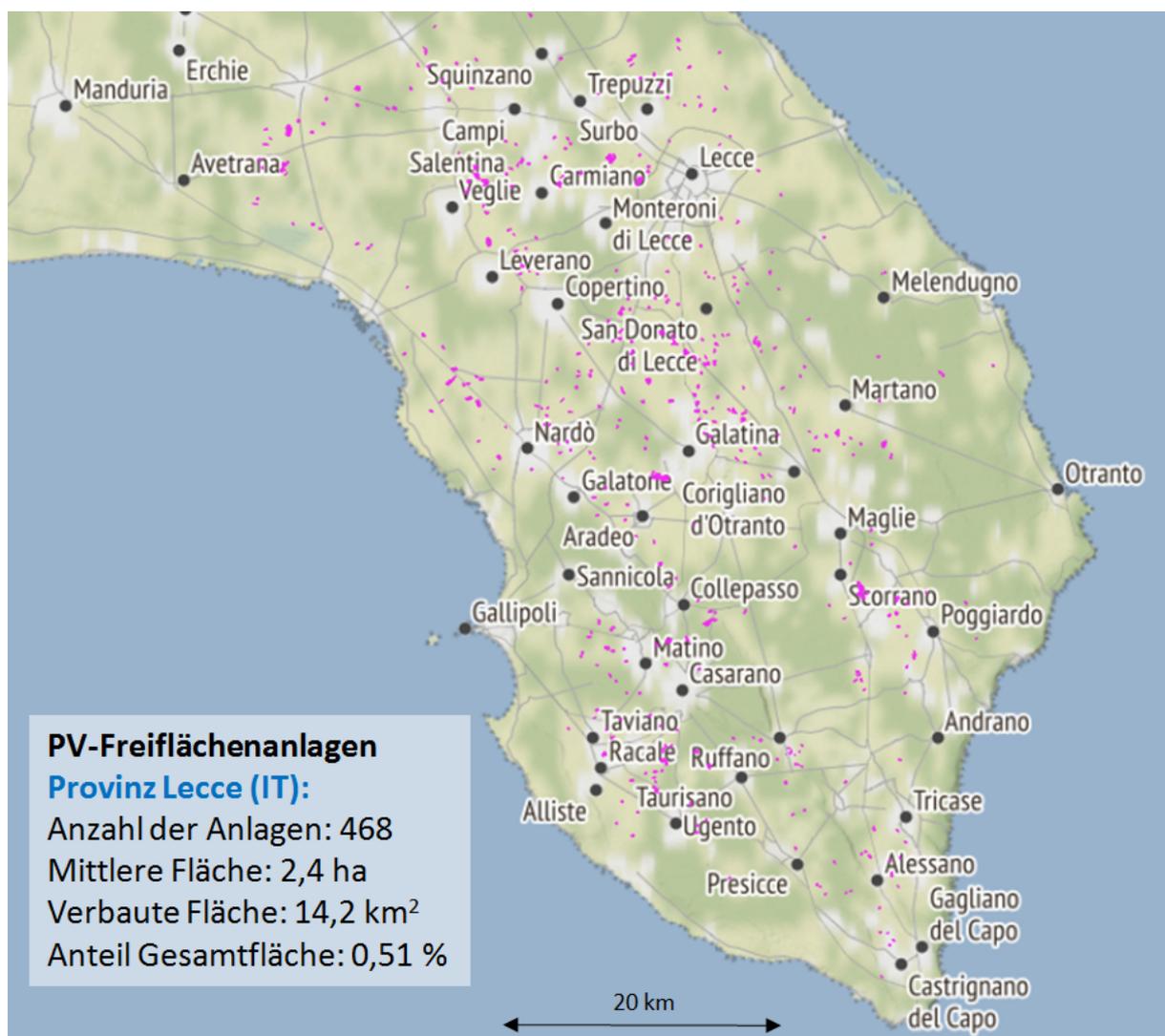


Abbildung 5: PV-Freiflächenanlagen in der Provinz Lecce (IT) – NUTS 3: ITF45
(Kartenquelle: QGIS, Karte: Stamen Terrain; eigene Bearbeitung).

PV-Freiflächenanlagen

Niederbayern (DE):

Anzahl der Anlagen: 499
Mittlere Fläche: 1,9 ha (-15% Großanlagen)
Verbaute Fläche: 15,2 km²
Anteil Gesamtfläche: 0,15 % (0,21 %)
51 % neben Bahn / Autobahn

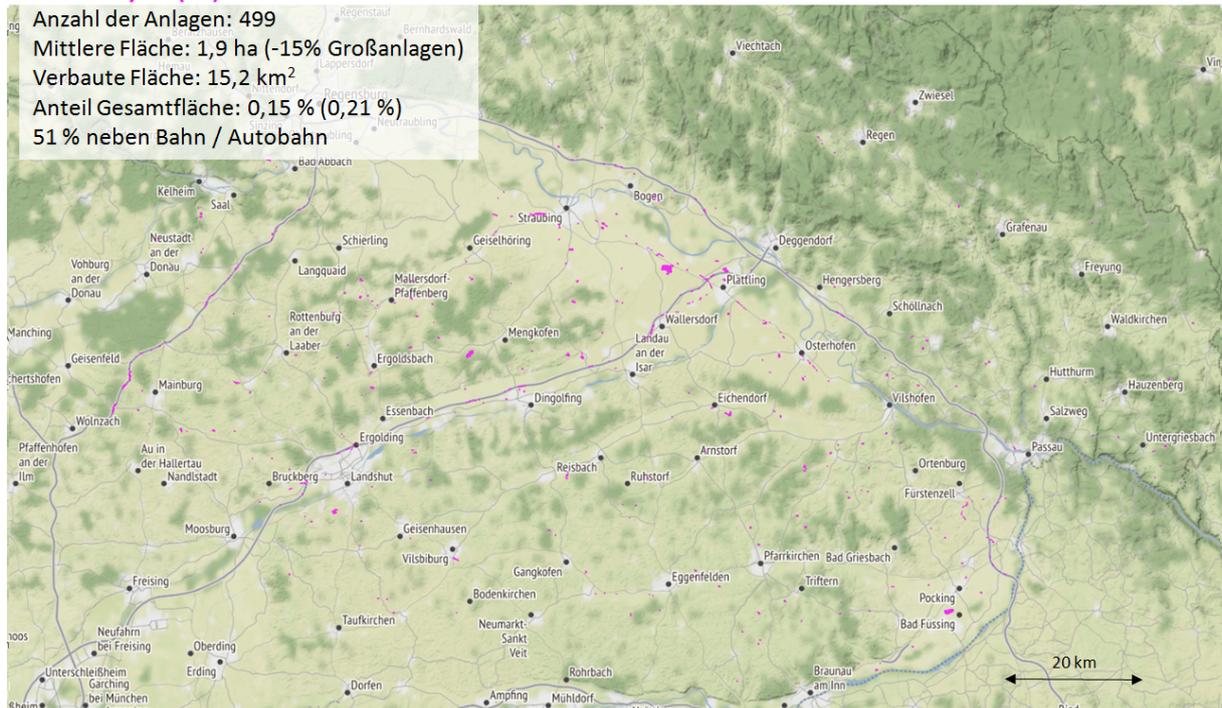


Abbildung 6: PV-Freiflächenanlagen in Niederbayern (DE) – NUTS 2: DE22
(Kartenquelle: QGIS, Karte: Stamen Terrain; eigene Bearbeitung).

PV-Freiflächenanlagen

Südmähren (CZ):

Anzahl der Anlagen: 221
Verbaute Fläche: 9,7 km²
Anteil Gesamtfläche: 0,14 %

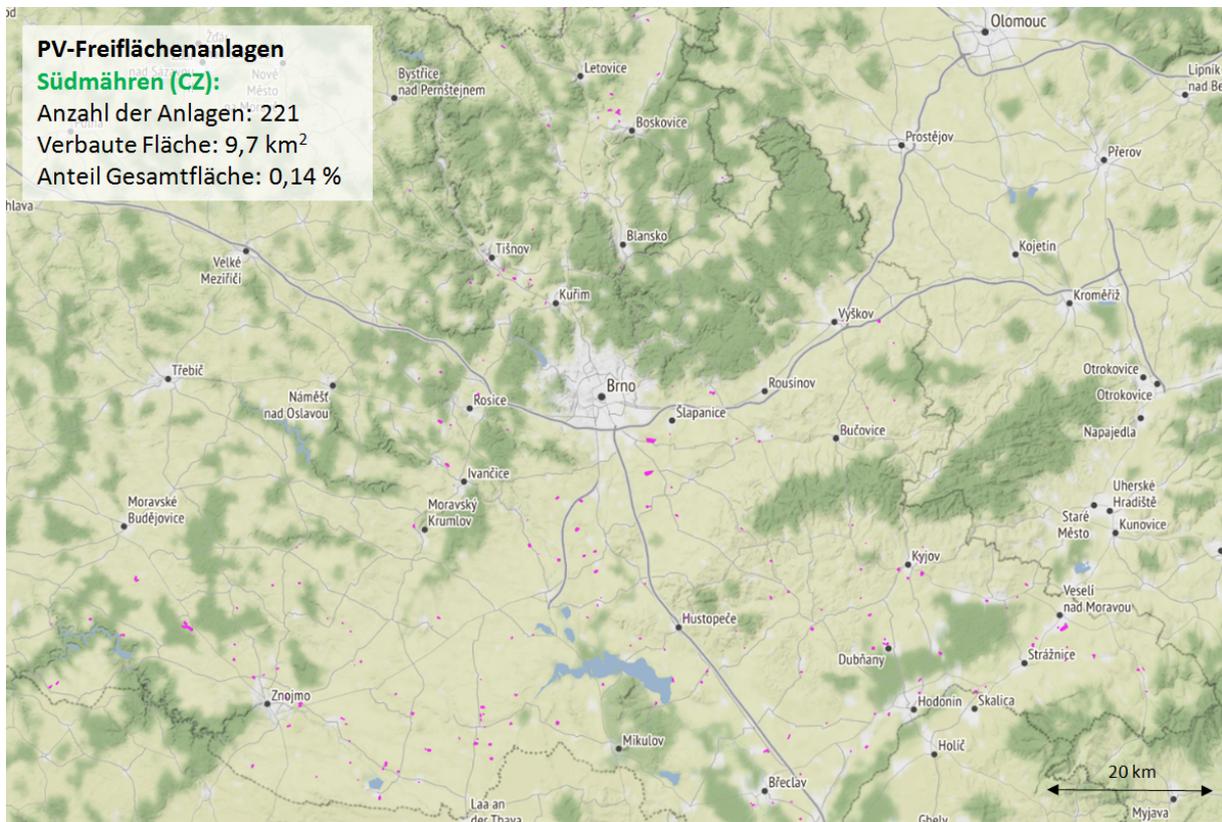


Abbildung 7: PV-Freiflächenanlagen in Südmähren (CZ) – NUTS 3: CZ064
(Kartenquelle: QGIS, Karte: Stamen Terrain; eigene Bearbeitung).

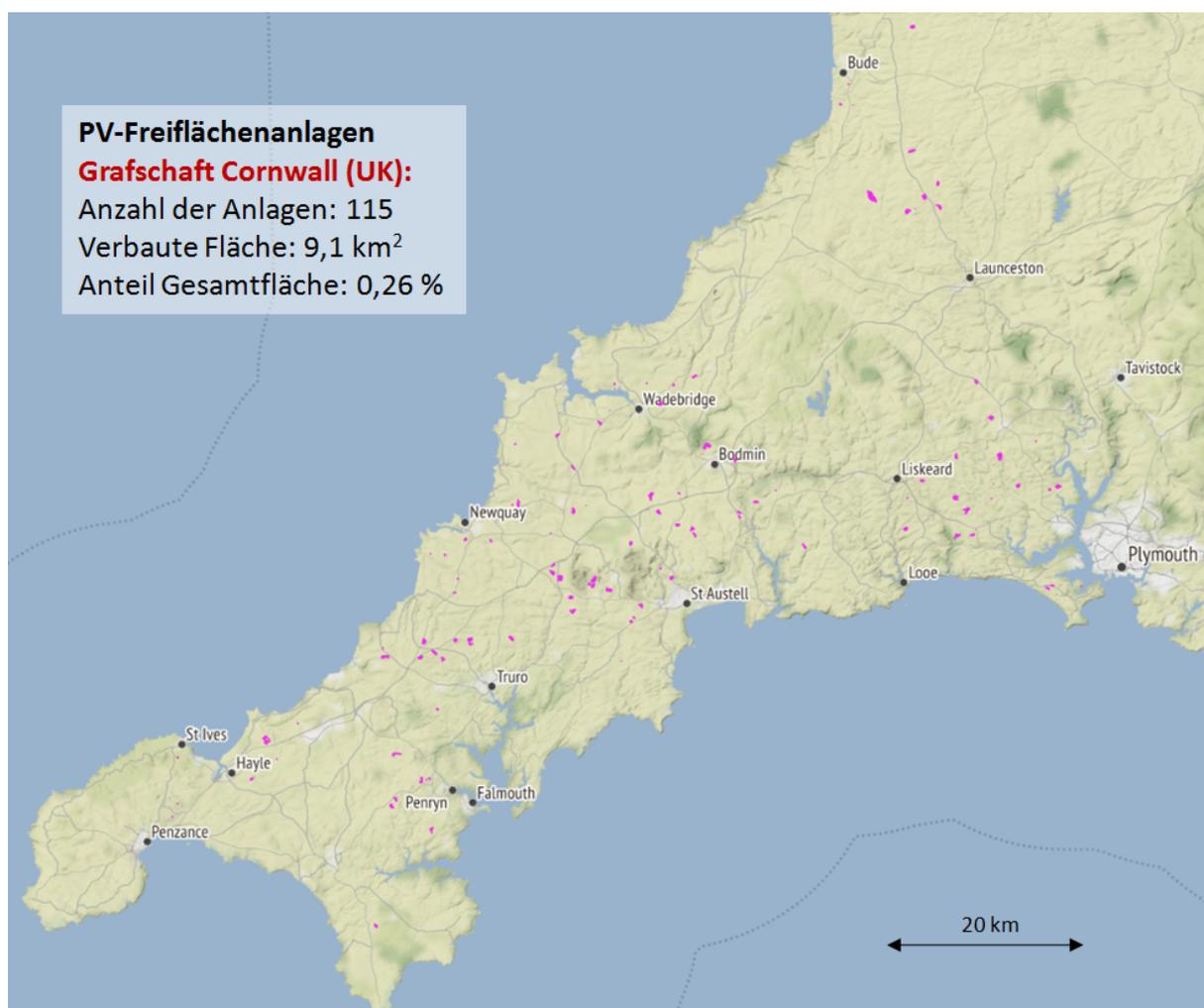


Abbildung 8: PV-Freiflächenanlagen in der Grafschaft Cornwall (UK) – NUTS 2: UKK3
(Kartenquelle: QGIS, Karte: Stamen Terrain; eigene Bearbeitung).

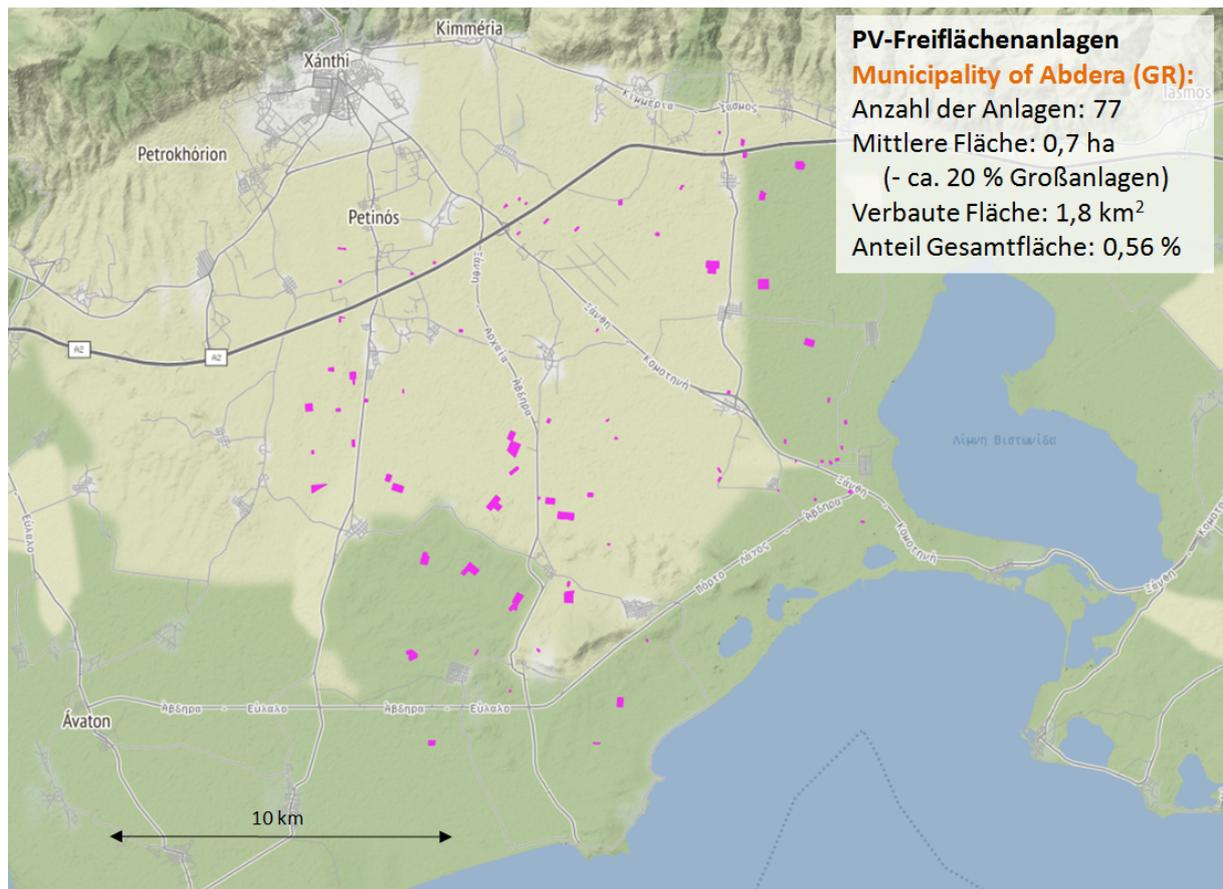


Abbildung 9: PV-Freiflächenanlagen in der Gemeinde Abdera / Region Xanthi (GR) – Teil von NUTS 3: EL512 (Kartenquelle: QGIS, Karte: Stamen Terrain; eigene Bearbeitung).

Die PV-Freiflächenanlagen aller Regionen scheinen überwiegend auf landwirtschaftlichem Boden errichtet worden zu sein, soweit dies in Google Earth erkennbar ist. Eine geringe Anzahl befindet sich in ehemaligen Steinbrüchen und Schottergruben, Industriegeländen oder auf ehemaligem militärischem Gelände. Genauere Untersuchungen wurden dazu jedoch nicht durchgeführt.

Einige Auffälligkeiten im Zuge der Kartierung sind folgende: In der Provinz Lecce wurde eine Anlage gefunden, die gemäß der Historie der Satellitenbilder vor 2015 nach wenigen Jahren Bestand offensichtlich wieder rückgebaut wurde, wobei die Punktfundamente noch sichtbar sind. In einer weiteren Anlage sind seit 2011 nur etwa 160 betonierte Kreisfundamente sichtbar, ohne dass die Anlage fertiggestellt wurde.

Eine Besonderheit stellt die Region Niederbayern dar: Hier wurden 51 % der PV-Freiflächenanlagen (nach Anzahl) entlang von Bahn- und Autobahntrassen errichtet. Flächenmäßig ergibt dies einen Anteil von 34 % der mit PV-Freiflächenanlagen verbauten Fläche. Im Detail sind dies 19 % der Flächen neben Bahntrassen und 15 % der Flächen entlang von Autobahnen.

4 Diskussion und Ausblick

In den untersuchten Regionen ist jeder 200ste bis jeder 500ste Quadratmeter Landesfläche mit einer PV-Freiflächenanlage besetzt. Diese Werte scheinen im Vergleich zu den diversen anderen Landnutzungsmöglichkeiten zu hoch zu sein. Insgesamt sollte die gesamte Bodenversiegelung im Rahmen der Energiewende neu untersucht und bewertet werden.

Es sollte weiterführend eine genauere Untersuchung der Flächenausnutzung innerhalb einer PV-Anlage durchgeführt werden, da es dazu wenig Literatur gibt. Insgesamt gibt es einen interdisziplinären Forschungsbedarf, der beispielsweise Energietechnik, Raumplanung und Technikfolgenabschätzung zusammenführt, um eine überregionale nachhaltige Energie- und Raumplanung zu unterstützen. Hierbei sollte auch die Frage untersucht werden, wer Besitzer und Betreiber einer PV-Freiflächenanlage ist oder sein soll, um einen "Ausverkauf" von Flächen an überregionale Investoren zu Lasten der Kommunen einzudämmen.

In der Literatur wird oftmals die installierte Leistung bzw. erzeugte elektrische Energie pro m² angegeben. Dies ist für eine regionale Bestandsaufnahme sinnvoll, jedoch nicht für zukünftige Planung. Es muss betont werden, dass in den errichteten PV-Anlagen einerseits unterschiedliche Modul-Technologien verbaut sind, also beispielsweise mono- oder multikristalline Module sowie verschiedene Dünnschicht-Technologien, die unterschiedliche Nennleistungen aufweisen. Darüber hinaus ändert sich jährlich der Stand der Technik in der Moduleffizienz, das heißt, im Lauf der Jahre wurden verschiedene Technologiegenerationen verbaut. Deshalb ist eine neu geplante PV-Freiflächenanlage nicht direkt vergleichbar mit Durchschnittswerten älterer Anlagen. Die Angabe der Anzahl an Modulen oder Modulquadratmeter erscheinen sinnvoller, um mithilfe eines Multiplikationsfaktors für die jeweilige Technologiegeneration und Sonneneinstrahlung Vergleiche zu ermöglichen.

Aus Sicht einer effizienten Flächennutzung wäre die Wahl der Modultechnologie die von monokristallinen Modulen der höchsten Effizienzklasse. Aus unterschiedlichen Gründen finanzieller und technologischer Art wird dies jedoch nicht immer durchgeführt, zumal auch der unterschiedliche Herstellungsaufwand – also die „Graue Energie“ - berücksichtigt werden muss. Die konkrete Ausführung einer Anlage wird also immer ein wohl durchdachter Kompromiss sein. Insofern muss überlegt werden, ob es sinnvoll ist, innerhalb weniger Jahre eine Technologie mit einer Lebensdauer von 25-30 Jahren bis an die räumlichen Kapazitätsgrenzen auszurollen, wie es vor allem in den Jahren 2010-2012 geschehen ist (vgl.: Franz & Piringer, 2020: Fig. 5).

Der priorisierte Ausbau von PV-Freiflächenanlagen an Standorten, die für keine andere Verwendung nutzbar sind, z.B. Altlasten, sollte in allen Regionen überprüft werden. Der Ausbau in schmalen Streifen entlang von Bahnlinien und Autobahnen, wie in Niederbayern, erscheint jedenfalls sinnvoller, als landwirtschaftlichen Boden dafür zu widmen.

Literatur

Capellán-Pérez, I., De Castro, C.; Arto, I. (2017) Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77, 760–782 (2017).

- Europäische Kommission (2022) Eurostat - Ihr Schlüssel zur europäischen Statistik. Website Portal: <https://ec.europa.eu/eurostat/de/home> [Feb. 2022].
- Ecoinvent (2017) Database ecoinvent 3.4. <http://www.ecoinvent.org/> [Feb. 2022].
- Franz, Manuela; Narodoslawsky, Michael (2020) Carbon Footprint, SPI und Flächenverbrauch von PV-Anlagen und anderen erneuerbaren/fossilen Energieerzeugungssystemen. 16. Symposium Energieinnovation, 12.-14.02.2020, Graz/Austria.
- Franz, Manuela; Piringner, Gerhard (2020) Market development and consequences on end-of-life management of photovoltaic implementation in Europe. *Energy Sustain Soc* 10, 31 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00263-4>.
- Fthenakis, Vasilis; Kim, Hyung (2009) Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1465–1474.
- Gasparatos, Alexandros; Doll, Christopher N.H.; Esteban, Miguel; Ahmed, Abubakari; Olang, Tabitha A. (2017) Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, April 2017, Pages 161-184.
- Hauschild, Michael Z.; Huijbregts, Mark A.J., Eds.(2015). *Life Cycle Impact Assessment (LCA–Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment)*. Springer, 2015, 339 pages.
- Koellner T, De Baan L, Beck T, Brandão M, Civit B, Goedkoop M, Margni M, Milà i Canals L, Müller-Wenk R, Weidema B, Wittstock B (2013) Principles for life cycle inventories of land use on a global scale. *Int J Life Cycle Assess* 18: 1203–1215. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0392-0>
- Mauro, G.; Lughì, V. (2017) Mapping land use impact of photovoltaic farms via crowdsourcing in the Province of Lecce (Southeastern Italy). *Solar Energy* 155 (2017) 434–444.
- Nonhebel, Sanderine (2005) Renewable energy and food supply: will there be enough land? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 9, Issue 2, April 2005, Pages 191-201.
- Ong, Sean; Campbell, Clinton; Denholm, Paul; Margolis, Robert; Heath, Garvin (2013) Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report NREL/TP-6A20-56290, June 2013.
- QGIS-Open Source Geographisches Informationssystem (2022) <https://www.qgis.org/> [Feb. 2022].
- Smil, Vaclav (2016) *Power density: a key to understanding energy sources and uses*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (2016).
- Squatrito, Riccardo; Sgroi, Filippo; Tudisca, Salvatore; Di Trapani, Anna Maria; Testa, Riccardo (2014) Post Feed-in Scheme Photovoltaic System Feasibility Evaluation in Italy: Sicilian Case Studies. *Energies* 2014, 7, 7147-7165; doi:10.3390/en7117147.
- Turney, Damon; Fthenakis, Vasilis (2011) Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 15, Issue 6, August 2011, Pages 3261-3270.
- Van de Ven, Dirk-Jan; Capellan-Peréz, Iñigo; Arto, Iñaki; Cazcarro, Ignacio; De Castro, Carlos; Patel, Pralit; Gonzalez-Eguino, Mikel (2021) The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports* (2021) 11:2907, Nature portfolio. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-82042-5.pdf> [Feb. 2021].
- Van Zalk, John; Behrens, Paul (2018) The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*, Volume 123, December 2018, Pages 83-91; doi: 10.1016/j.enpol.2018.08.023.
- Vrînceanu, Alexandra; Grigorescu, Ines; Dumitraşcu, Monica; Mocanu, Irena; Dumitrică, Cristina (2019) Impacts of Photovoltaic Farms on the Environment in the Romanian Plain. *Energies* 2019, 12, 2533; doi:10.3390/en12132533.