



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Gebäudeintegrierte und Freiflächen- Photovoltaik - Vergleich hinsichtlich Ökobilanz und Flächenpotential

verfasst von

Anna NEUMÜLLER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Wien, März 2023

Betreut von:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. MSc. Dr.Doris Österreicher

Mitbetreut von:

Dipl. -Ing. Stefan Geier

Institut für Raumplanung,

Umweltplanung und Bodenordnung (IRUB)

Kurzfassung

Das Ziel der Masterarbeit ist es die ökologischen Auswirkungen von Dach- und Freiflächen-Photovoltaikanlagen hinsichtlich ihrer Unterkonstruktionen und Flächeninanspruchnahme zu analysieren und in Vergleich zueinander zu setzen. Dazu wird die folgende Forschungsfrage gestellt: Welche Photovoltaik-Anlagentypen sind im direkten Vergleich zwischen Photovoltaik-Freiflächenanlagen und gebäudegebundenen Photovoltaik-Anlagen am effizientesten bezüglich Ökobilanz und Flächeninanspruchnahme? Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurden einerseits die Aufbauten der Photovoltaik-Anlagen mit einer Lebenszyklusanalyse und ihrem Global Warming Potential verglichen und andererseits die Verteilung im Raum und deren Bodeninanspruchnahme anhand von zwei Beispielen analysiert. Die Analyse erfolgte zuerst rein quantitativ und im Anschluss qualitativ. Die Auswertung der Ergebnisse anhand der gewählten Methodik zeigt, dass es Unterschiede hinsichtlich Ökobilanz und Flächeninanspruchnahme in Zusammenhang mit den Aufbauten der Photovoltaikanlagen in den Freiflächen und am Dach gibt. Das Global Warming Potential ist bei den Aufbauten der Photovoltaik-Freiflächenanlagen höher als bei Dachgebundenen-Photovoltaikanlagen. In den Anwendungsbeispielen zeigt das Ergebnis jedoch, dass nicht in allen Gemeinden die Dachflächen ausreichen, um den Bedarf an elektrischer Energie zu decken.

Abstract

The aim of this master thesis is to analyse and compare the ecological effects of the substructure and land use of rooftop and open-space photovoltaic. The research question is: Which photovoltaic-system types are the most efficient in terms of ecological balance and land use in a direct comparison between photovoltaic-open-space and roof-mounted-photovoltaic systems? To answer the research question, the substructure of the photovoltaic systems was analysed with a life cycle assessment and their distribution and soil consumption were examined using two examples. The analysis is first purely quantitative and then qualitative. The evaluation of the results using the selected methodology shows that there are differences in terms of ecological balance and land use in connection with the substructures of the photovoltaic systems in the open spaces and on rooftops. The global warming potential is higher for the structures of the photovoltaic open-space systems than for roof-mounted photovoltaic systems. Therefore, the substructure on the roof-mounted photovoltaic is preferable. In the examples, however, the result shows that the roof areas in all communities are not enough to cover the demand for electrical energy.

Vorwort

Nach meinem Studium auf der Universität für Bodenkultur wurde im Master mein Interesse für die Energieraumplanung geweckt. Demnach hat es mich gefreut ein Thema ausarbeiten zu können mit dem ich zur Thematik der Energie beitragen kann.

Besonderen Dank gilt dabei meinen Betreuern der Masterarbeit und außerdem Dipl.-Ing. Dr. Lore Abart-Heriszt, die sich Zeit genommen hat, um mir viele Fragen im Bezug Energie zu beantworten und damit zu meiner Arbeit beigetragen hat. Weiteres möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich mein Studium unterstützt und begleitet hat und ohne jene es nicht möglich gewesen wäre. Besonderer Dank gilt diesbezüglich meinem Mann, der mir immer die Zeit gegeben hat, mich um mein Studium kümmern zu können und mich auch in jeder anderen Lebenslage immer mit aller Kraft unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 12 |
| 1.1 | Relevanz der Forschung und Problemstellung | 12 |
| 1.2 | Hypothese | 13 |
| 1.3 | Forschungsfragen | 13 |
| 1.3.1 | Arbeitsfragen | 13 |
| 1.3.2 | Methodik und Ziel der Masterarbeit | 14 |
| 2 | Literaturrecherche und Grundlagen der Forschung | 16 |
| 2.1 | Situation in Österreich | 16 |
| 2.1.1.1 | Flächenpotentiale Photovoltaik in Österreich | 18 |
| 2.2 | Rechtliche Grundlagen von PV- Anlagen in Österreich | 20 |
| 2.2.1 | Bundesrechtliche Rahmenbedingungen | 20 |
| 2.2.2 | Landesrechtliche Rahmenbedingungen | 22 |
| 2.2.3 | Strategien und gesetzliche Voraussetzungen in der Steiermark | 23 |
| 2.2.3.1 | Elektrizitätsrecht | 23 |
| 2.2.3.2 | Naturschutzrecht | 23 |
| 2.2.3.3 | Baurecht | 24 |
| 2.2.3.4 | Raumordnungsrecht | 24 |
| 2.2.3.5 | Strategische Leitfäden zur Errichtung von PV-Anlagen | 26 |
| 2.2.4 | Gesetzmäßigkeiten auf Gemeindeebene in der Steiermark | 32 |
| 2.2.4.1 | Rahmenbedingungen der Gemeinde Weiz und Thannhausen | 33 |
| 2.3 | Nutzungskonflikte | 33 |
| 2.4 | Technische Grundlage von PV-Anlagen | 34 |
| 2.4.1 | Systemkategorien und Technologien | 35 |
| 2.4.2 | Mono- und polykristalline Solarzellen | 36 |
| 2.4.3 | Systembilanz einer Photovoltaikanlage (Balance of the system (BOS)-Ausrüstung) | 38 |
| 2.4.4 | Betriebsbedingungen und Leitungen von PV-Anlagen | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5 | Freiflächen PV-Anlagentypen _____ | 39 |
| 2.6 | Gebäudegebundene PV-Anlagen _____ | 39 |
| 2.7 | Kosten von PV-Anlagen _____ | 42 |
| 3 | Methodik _____ | 45 |
| 3.1 | Lebenszyklus- Analyse und CO ₂ Potential von PV-Konstruktionen _____ | 47 |
| 3.1.1 | Grundlagen für die ökologische Bewertung von Baustoffen _____ | 48 |
| 3.1.1.1 | Verwendete Baustoffe und deren GWP (Global Warming Potential) _____ | 49 |
| 3.1.2 | Ziel und Umfang der Lebenszyklusanalyse _____ | 50 |
| 3.1.3 | Bestandteile der Aufbauten von PV-Anlagen am Dach und in der Freifläche ____ | 51 |
| 3.1.3.1 | Fundamente _____ | 51 |
| 3.1.3.2 | Freiflächen PV-Anlagen _____ | 55 |
| 3.1.3.3 | Gebäudegebundene PV-Anlagen _____ | 63 |
| 3.1.4 | Interpretation der Daten aus der Lebenszyklusanalyse und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV _____ | 67 |
| 3.1.5 | Berechnung der „Energy Payback Time“ (EPBT) _____ | 68 |
| 3.1.6 | Interpretation der Daten _____ | 72 |
| 3.2 | Energiemosaik und Nutzenergieanalyse Steiermark 2019 _____ | 72 |
| 3.2.1 | Nutzenergieanalyse Steiermark 2019 _____ | 73 |
| 3.2.2 | Strommix und Anteil an erneuerbarem Strom in Österreich _____ | 74 |
| 3.2.3 | Energiemosaik und Nutzenergieanalyse der Gemeinde Weiz _____ | 75 |
| 3.2.4 | Energiemosaik und Nutzenergieanalyse der Gemeinde Thannhausen _____ | 77 |
| 3.3 | GIS- Analyse in der Gemeinde Weiz und Thannhausen, Österreich _____ | 80 |
| 3.4 | GIS-Analyse _____ | 81 |
| 3.4.1 | GIS- Analyse Weiz _____ | 81 |
| 3.4.2 | GIS-Analyse Thannhausen _____ | 83 |
| 3.4.3 | Vergleich von Thannhausen und Weiz anhand der GIS- Daten und des Energieverbrauchs der Gemeinden _____ | 84 |
| 3.5 | Zusammenfassung der GIS-Analyse mit den Ergebnissen der Lebenszyklus-Analyse | |
| | 84 | |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Diskussion | 85 |
| 5 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 87 |
| 6 | Quellenverzeichnis | 89 |
| 6.1 | Literaturverzeichnis | 89 |
| 6.2 | Rechtsquellen | 96 |
| 7 | Anhang | 97 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Materialliste mit deren GWP in kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF _{OI} (Quelle: baubook o.j.) | 50 |
| Tabelle 2: Fundamentbeschreibung und GWP (Quelle: eigene Berechnung 2022) | 54 |
| Tabelle 3: Typen für PV-Freiflächenanlagen und ihr Einsatzbereich sowie deren GWP (Quelle: eigene Überarbeitung 2022) | 63 |
| Tabelle 4: Typen für Gebäudegebundene PV-Anlagen und ihr Einsatzbereich sowie deren GWP (Quelle: eigene Überarbeitung 2022) | 67 |
| Tabelle 5: PV-Anlagentypen für Dachkonstruktionen mit deren EPBT (Quelle: eigene Berechnung 2022)..... | 70 |
| Tabelle 6: PV-Anlagentypen für Freiflächenanlagen mit deren EPBT (Quelle: eigene Berechnung 2022)..... | 70 |
| Tabelle 7: Energiebilanzkonformer Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Weiz in MWh/a (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 76 |
| Tabelle 8: Energiebilanzkonformer Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Thannhausen in MWh/a (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 79 |
| Tabelle 9: Gebäudegebundene PV- Anlagen und ihre Bauteile und Materialien (Quelle: eigene Bearbeitung 2022) | 98 |
| Tabelle 10: Freiflächen PV- Anlagen und ihre Bauteile und Materialien (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)..... | 104 |
| Tabelle 11: Bauteile der PV-Unterkonstruktionen und deren GWP und PENR Tot (Quelle: eigene Berechnung, 2022) | 106 |
| Tabelle 12: GWP in kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF _{OI} und PENR in kWh der PV-Unterkonstruktionen auf dem Dach und in der Freifläche für ein PV- Modul (Quelle: eigene Berechnung 2022) | 107 |
| Tabelle 13: EPBT der Fundamente der PV-Unterkonstruktionen (Quelle: eigene Berechnung 2022)..... | 107 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: PV- Potentiale (Quelle: Kelm et al. 2019, 20)..... | 18 |
| Abbildung 2: PV-Potentiale (Quelle: Fechner 2020, 9)..... | 19 |
| Abbildung 3: Installierte Solarzellentypen in Österreich 2010 bis 2019 (Quelle: Biermayr et. al. 2019, 209)..... | 37 |
| Abbildung 4: Montageart der in Österreich installierten Photovoltaikanlagen 2019 bezogen auf die im Jahr 2019 neu installierte PV-Leistung n=26, (Quelle: Erhebung Technikum Wien, Biermayr et. al. 2019, 110) | 42 |
| Abbildung 5: Kosten für PV-Anlagen in Euro je Flächenkategorie (Quelle: Fechner 2020, 50) | 43 |
| Abbildung 6: Moduleinkaufspreise von Anlagengerichtern und Planern 2011 bis 2019 Mittelwert und Badbreite (Quelle Biermayr et. al. 2019, 112)..... | 44 |
| Abbildung 7: Überblick über die Methodik der Masterarbeit (Quelle: eigene Bearbeitung 2022) | 45 |
| Abbildung 8: Arbeitsschritte der Lebenszyklusanalyse (Quelle: eigene Bearbeitung 2022) .. | 46 |
| Abbildung 9: Arbeitsschritte der GIS-Analyse (Quelle: eigene Bearbeitung 2022) | 47 |
| Abbildung 10: Phasen und Applikationen einer Lebenszyklusanalyse (Quelle: Rebitzer 2004, 704)..... | 48 |
| Abbildung 11: Betonfuß (Quelle: pv-mounting o.j.) | 51 |
| Abbildung 12: Rammprofil (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11)..... | 51 |
| Abbildung 13: Schraubanker (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11)..... | 52 |
| Abbildung 14: Streifenfundament (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11) | 52 |
| Abbildung 15: Spinnanker (Quelle: WORF System GmbH 2022) | 52 |
| Abbildung 16: Vergleich der GWP von Fundamenten (Quelle: eigene Überarbeitung 2022) .. | 55 |
| Abbildung 17: Module mit Ost- West Ausrichtung in der Freifläche (Quelle: energykonzept.net o.j.)..... | 56 |
| Abbildung 18: Solarmodule mit Masthalterung (Quelle: brsolarbracket.com o.j.) | 56 |
| Abbildung 19: Vertikale bifaziale PV-Anlagen (Quelle: kommunaltopinform.de o.j.)..... | 57 |
| Abbildung 20: Starre Südausrichtung mit einem Mast (Quelle: memodo.de 2021) | 57 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 21: Starre Südausrichtung mit zwei Masten (Quelle: solaranlagen-portal.com o.j.) | 58 |
| Abbildung 22: PV-Module mit starrer Südausrichtung mit Holz als Unterkonstruktion (Quelle: sun-consult.de 2006)..... | 58 |
| Abbildung 23: PV-Module auf zweiter Ebene (Quelle: Fraunhofer ISE o.j.) | 59 |
| Abbildung 24: PV-Parkplatzüberdachung aus Stahl für ein Auto | 60 |
| Abbildung 25: PV-Module mit Parkplatzüberdachung für ein Auto (Quelle: meintechblog.de o.j.)..... | 60 |
| Abbildung 26: Solarbaum im urbanen Raum (Quelle: Clarke D. 2008) | 61 |
| Abbildung 27: Dachhaken für Solarmodul (Quelle: Altamira.at o.j.) | 64 |
| Abbildung 28: Dachhaken mit Profil für Solarmodule (Quelle: bristar o.j.) | 64 |
| Abbildung 29: Winkelverstellbares Basismodul für ein PV-Modul (Quelle: ECO- WORTHY o.j.) | 65 |
| Abbildung 30: Winkelverstellbares Basismodul mit Botenbeschwerungsfuß (Quelle: pv- mounting.com o.j.)..... | 65 |
| Abbildung 31: Aufdachkonstruktion mit Ost- West- Ausrichtung der PV-Module (Quelle: diconal.de o.j.)..... | 66 |
| Abbildung 32: GWP der ausgewählten Aufbauten von PV-Anlagen und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV (Quelle: eigene Überarbeitung 2022)..... | 68 |
| Abbildung 33: EPBT der ausgewählten Aufbauten von PV- Anlagen und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV (Quelle: eigene Berechnung 2022) | 71 |
| Abbildung 34: Prozentuelle Anteile der Quellen von elektrischer Energie ohne Berücksichtigung der Exporte von Strom aus erneuerbaren Quellen stand 2016 (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 74 |
| Abbildung 35: Energieverbrauch und Treibhausgasimmissionen Anteile der Nutzungen der Gemeinde Weiz (Quelle: Albart- Heriszt et. al. 2022c, 3)..... | 75 |
| Abbildung 36: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 76 |
| Abbildung 37: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie von Industrie und Gewerbe in der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 77 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 38: Energieverbrauch und Treibhausgasimmissionen Anteil der Nutzungen der Gemeinde Thannhausen (Quelle: Albart- Heriszt et. al. 2022b, 3)..... | 78 |
| Abbildung 39: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Thannhausen anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 79 |
| Abbildung 40: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie von Industrie und Gewerbe in der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022) | 80 |
| Abbildung 41: Gemeindegrenze Weiz (Quelle: Open Street Map 2022) | 82 |
| Abbildung 42: Gemeindegrenze Thannhausen (Quelle: Open Street Map 2022)..... | 83 |

Abkürzungsverzeichnis

BOS *Balance of the system*
BZF *Bezugsfläche*
ENRT *Erneuerbare Primärenergie*
EPBT *Energy Payback Time*
GIPV *Bauwerkintegrierte Photovoltaik*
GIS *Geoinformationssystem*
GWP *Global Warming Potential*
kWp *Kilowatt-Peak*
PV *Photovoltaik*

1 Einleitung

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sind inzwischen Teil des Landschaftsbildes in Österreich und haben immer noch weiteres Ausbaupotential. Politisch und gesellschaftlich wird ein weiterer Ausbau an erneuerbaren Energiequellen gefordert und gleichzeitig kritisiert. Um einen nachhaltigen und kontrollierten Ausbau von Photovoltaikanlagen zu garantieren, sind gezielte und übergreifende Forschungen im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit und räumlichen Voraussetzungen zentrale Fragestellungen.

1.1 Relevanz der Forschung und Problemstellung

Es ist eine akzeptierte Tatsache, dass der Lebensstil der Industrieländer nicht nachhaltig ist. Diese Erkenntnis ist der Ausgangspunkt vieler politischer Programme und Forschungsansätzen, die zum Ziel haben den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren und somit soziale Probleme zu verbessern und wirtschaftlichen Wohlstand zu gewährleisten (Stoeglehner 2008, 421).

Diese Annahme ist auch Grundlagen für die vorliegende Masterarbeit. Der Ausgangspunkt sind die nationalen Energieziele für Österreich, nämlich bis 2030 Treibhausgase in Zusammenhang mit den EU-Zielen zu reduzieren (Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus 2019, 8). Diese Ziele werden in der Energie-Roadmap der Europäischen Union beschrieben. Angestrebt wird, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95 % zu reduzieren. Im technischen Bereich bedeutet dies eine Diversifizierung der Technologien. Keine Technologie ist perfekt, so wird auf eine Vielfalt gesetzt, um die Dekarbonisierung und die öffentliche Akzeptanz zu verbessern. Dies bedeutet starke Förderungsmaßnahmen für erneuerbare Energiequellen (European Commission 2011, 2 ff.). Um dieses Ziel zu erreichen, wird eine Umstellung auf erneuerbare Energien in den Planungsprozess einbezogen. Gesellschaftlich und wirtschaftlich werden Beiträge zur Energiewende getätigt, um diese voranzutreiben (Stoeglehner 2014, 1). Solarenergie wird in diesem Kontext zu einem der wichtigsten Energieträger (Stadt Wien 2021, 6). Die Wissenschaft kann zu einer nachhaltigen Zukunft die Entwicklung von Methoden zur Einschätzung der Ausgangslage beitragen. Dazu gehört die Bewertung von Maßnahmen, welche zur Zielerreichung führen. So ist die Voraussetzung zur Reduktion des ökologischen Fußabdruckes nicht nur die Reduktion, sondern auch die Änderung von Produktions- und Konsummustern. In Bezug auf die Energiewende bedeutet dies eine gezielte räumliche und technische Planung unter Berücksichtigung der Aspekte der Nachhaltigkeit. Die Entscheidungsfindung für eine nachhaltige Entwicklung ist ein komplexer Prozess. Jede einzelne Entscheidung wird in einem

hierarchischen Kontext gesehen und wird eingebettet in internationale, nationale, regionale, lokale, sektorale und individuelle Rahmenbedingungen (Stoeglehner 2008, 421 ff.).

Diese Arbeit ist ein Beitrag zum Entscheidungsprozess und zum nachhaltigen Ausbau von Photovoltaikanlagen. Dazu ist eine technische und räumliche Untersuchung die Grundlage der Forschung. Einerseits werden alle Potentialflächen für Photovoltaikanlagen untersucht, dies bedeutet in der Freifläche und auf Gebäuden. Aber nicht nur räumlich, sondern auch technisch, wird die Thematik beleuchtet, um den Unterschied und die Potentiale von Freiflächen- und Gebäude-Photovoltaik aufzuzeigen und deren Effizienz in einem nachhaltigen Kontext zu evaluieren.

1.2 Hypothese

Freiflächen- und gebäudegebundene Photovoltaikanlagen unterscheiden sich in zahlreichen Aspekten, welche die Nachhaltigkeit der Anlage beeinflussen. Ein Unterschied ergibt sich aus den verwendeten Materialien der Befestigungsart. Dies spielt im Freiraum zusätzlich zu der Flächeninanspruchnahme eine bedeutende Rolle.

1.3 Forschungsfragen

- Welche PV-Anlagentypen sind im direkten Vergleich zwischen PV-Freiflächenanlagen und gebäudegebundenen PV-Anlagen am effizientesten bezüglich Ökobilanz und Flächeninanspruchnahme?

1.3.1 Arbeitsfragen

- Worin liegen die Unterschiede zwischen Freiflächen- und gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen bezogen auf den Lebenszyklus der Aufbauten und Befestigungsstrukturen?
- Welche Unterschiede bestehen zwischen der Landnutzung sowie Flächeninanspruchnahme bei Freiflächen- und gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen und deren Aufbauten?
- Wie können die theoretischen Potentiale für Freiflächen- und gebäudeintegrierten PV-Anlagen hinsichtlich Flächeninanspruchnahme beispielhaft verglichen werden?

1.3.2 Methodik und Ziel der Masterarbeit

Um Ergebnisse in dieser Masterarbeit zu erhalten, wurden bestimmte Methoden ausgewählt. Diese sind die Basis für die Bearbeitung der Fragestellungen. Die Organisation und das Vorgehen sind zentral, um wissenschaftlich fundierte Ergebnisse zu erzielen.

Grundlage dieser Arbeit ist die Literaturrecherche, die den aktuellen Kenntnisstand über Photovoltaikanlagen zusammenfasst, der für diese Arbeit von Relevanz ist. Ein Teil davon befasst sich mit der Technik von Photovoltaik-Modulen, der andere beschreibt Freiflächen- und gebäudeintegrierte Photovoltaik-Systeme. Darüber hinaus gibt es Beschreibungen zu Nutzungskonflikten und den rechtlichen Hintergründen von Photovoltaikanlagen. In diesem Zusammenhang ist die Situation in Österreich Teil der Recherche. Auch Kosten und Effizienz werden untersucht. Die Literaturrecherche ist die Grundlage für die Interpretation der im Kapitel der Methodik erhobenen Daten. Sie beinhaltet die qualitative Ebene, zudem die Erläuterung der Daten und Beschreibung der Ergebnisse dieser Arbeit.

Das Zentrum der Methodik dieser Arbeit ist im nächsten Schritt eine Lebenszyklusanalyse der Aufbauten von PV-Anlagen. Diesbezüglich werden Freiflächen- und Aufdachkonstruktionen verglichen. Zuerst werden Anlagentypen definiert, welche zum Vergleich herangezogen werden. Dann werden die Typen hinsichtlich ihres Global Warming Potentials (GWP) und ihrer Energy Payback Time (EPBT) untersucht. Dabei geht es um den Vergleich der Aufbauten und Unterkonstruktionen der Photovoltaikanlagen hinsichtlich der Unterschiede zwischen Freiflächen- und Dach-PV. Die Teile der verschiedenen Aufbauten sind so gewählt, dass sie miteinander vergleichbar sind. Dies ist bezogen auf die Materialien und auf die Aufbauten. Zusätzlich werden überall die gleichen Modultypen angenommen.

Dies erfolgt zuerst rein quantitativ, um eine Übersicht über die PV-Anlagentypen zu erlangen. Es folgt eine anschließende qualitative Analyse eine Rolle, da nicht alle PV-Anlagentypen überall eingesetzt werden können und es bei einigen Typen eine Doppelnutzung gibt, welche sich positiv auf die Landschaft auswirken kann. Zentral in diesem Teil der Arbeit ist der Vergleich der PV-Anlagentypen hinsichtlich Freifläche und Gebäude. Die Methodik ist so aufgebaut, dass die PV-Anlagentypen verglichen werden können, und gibt eine Erkenntnis über deren Nachhaltigkeit.

In einem weiteren Schritt werden die Erkenntnisse aus der Lebenszyklusanalyse in einen räumlichen Kontext gebracht, um die ökologischen Auswirkungen und das Potential von PV-Anlagen in ein konkretes Beispiel zu integrieren. Dies wird anhand einer Analyse mittels Geoinformationssystem (GIS) durchgeführt. So können Potentiale für PV-Anlagen festgelegt und ermittelt werden. Es werden zwei unterschiedliche Gemeinden in Österreich ausgewählt, um diese miteinander vergleichen zu können und Möglichkeiten für Dach- und Freiflächen-

Photovoltaikanlagen zu definieren. Dies erfolgt zuerst rein quantitativ, vor allem im Freiraum spielt aber die qualitative Ebene eine erhebliche Rolle. Auf quantitativer und qualitativer Ebene wird das Anwendungsbeispiel auch in Bezug zur Lebenszyklusanalyse gesetzt, um die rein technischen Daten in einen praktischen Kontext zu bringen. Auch die Literatur spielt eine zentrale Rolle, da sie die Grundlage für diese Arbeit und die Forschung bildet und für die Interpretation der Daten in einem räumlichen Kontext essenziell ist.

Das Ergebnis der Arbeit beschreibt die Unterschiede zwischen Gebäude- und Freiflächen-PV in Bezug auf deren Ökobilanz und zeigt den möglichen Einsatz von PV-Anlagen anhand von zwei Gemeinden in Österreich auf. Die Anwendung dieser Methoden soll konsistente Ergebnisse generieren, die in Kombination mit den vorangegangenen Forschungsfragen interpretiert werden können.

2 Literaturrecherche und Grundlagen der Forschung

Österreich hat sich auf Grund des Klimawandels Ziele gesetzt, um die Energiewende europaweit voranzutreiben. Dementsprechend wurden bereits politische Schritte für eine Veränderung gesetzt, dennoch sind weitere strategische Grundlagen zu schaffen, um Österreich klimaneutral zu gestalten. Der strukturierte Ausbau der Photovoltaik als erneuerbare Energietechnologie spielt dabei eine zentrale Rolle. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie Ausbaupotentiale sind zu prüfen und in Frage zu stellen, um einen gezielten PV-Ausbau zu ermöglichen.

2.1 Situation in Österreich

Die Veränderung des Klimas ist auf der ganzen Welt eine ökologische, ökonomische und soziale Herausforderung. Deshalb hat die österreichische Bundesregierung notwendige Schritte definiert, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Ziel ist ein klimaneutrales Österreich bis spätestens 2040. In diesem Zusammenhang soll Österreich ein Klimaschutzvorreiter für Europa sein (Die neue Volkspartei und Die Grünen 2020, 112). Die Europäische Union hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 80-95% der Treibhausgasemission zu reduzieren (European Commission 2011, 2). Schon bis 2030 soll 100% des Stroms in Österreich aus erneuerbaren Energiequellen kommen. Dabei sollen klare Ausbauziele für alle Technologien definiert werden. Die Versorgungs- und Netzsicherheit muss ebenfalls gewährleistet sein damit theoretische Blackout-Szenarien nicht zur Realität werden. Zur Erreichung der Ziele wird das Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) von der Regierung in Kraft gesetzt. Es ist als Sammelgesetznovelle implementiert und zieht eine Reform der Ökostromförderung nach sich (Die neue Volkspartei und Die Grünen 2020, 72- 73,79).

Da sich die österreichische Regierung das Ziel gesetzt hat, Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu beziehen, sollen 11 TWh bis 2030 aus Photovoltaik generiert werden. Somit wird die Photovoltaik zu einer wichtigen Energiequelle für die Energiewende (Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus 2019, 8 ff.).

Der Großteil der Forschung liegt bei gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen. Diese Forschung hat auf Grund der hohen Gebäudedichte eher in Städten Relevanz, jedoch ist das Potential nicht ausreichend, um die gesetzten Klimaziele zu erreichen. Mit den gesetzlichen Rahmenbedingungen und den technischen Strukturen in Österreich können nur 4 TWh mit Strom aus gebäudeintegrierter Photovoltaik erzeugt werden (Fechner 2020, 3). Für Freiflächen bedeutet dies, dass mindestens 5,7 TWh bis 2030 gebaut werden müssen. Pro MW (1GWh) werden 1,6 ha an Fläche gebraucht, daher müsste eine Fläche von 91 km² bis 2030 für PV-

Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund von neuesten Entwicklungen zur Effektivität von PV-Paneelen wird von einer geringeren Flächeninanspruchnahme ausgegangen (1ha/MW). Demnach reduziert sich die Fläche auf 57 km² und diese Fläche entspricht 0,2% der landwirtschaftlich genutzten Fläche Österreichs. Deshalb ist sowohl bei einem Ausbau der Freiflächen-PV als auch der gebäudeintegrierten PV ein gesteuerter Vorgang essenziell (Fechner 2020, 4). Die Potentiale für PV-Anlagen unterscheiden sich räumlich je nachdem, ob sich die Fläche im Gebirge, auf Agrarflächen oder in urbanen Gebieten befindet. So zeigen Flächen mit hoher Populationsdichte ein hohes Potential für gebäudeintegrierte PV-Anlagen. In der Freifläche kann österreichweit auch zwischen alpinem und voralpinem Terrain unterschieden werden. Insgesamt hat Österreich ein Freiflächenpotential für 1614 TWh, wobei diese Flächen nur außerhalb der Alpen und auf Talböden zu finden sind. Dies sind Flächen, welche auch für die Landwirtschaft essenziell sind (Mikovits et. al 2021, 7 ff). Deshalb ist es von Bedeutung eine klare Priorisierung von Flächen aufgrund von erstellten Parametern wie Flächenqualität, möglichem erzielbarem Nebennutzen, aber auch eine Einschätzung der Akzeptanz in der Bevölkerung zu definieren (Fechner 2020, 4). In der Abschätzung der Potentiale auf Freiflächen treten jedoch deutliche Unterschiede auf. Dies betrifft vor allem die zugrundeliegenden Flächenkategorien (Koscher 2021, 32).

Der Stromzuwachs bis 2050 stellt einen Indikator da, um den zukünftigen Bedarf an Strom einschätzen zu können. Deshalb sollen bis 2050 bis zu 30 TWh aus der Photovoltaik stammen. Das bedeutet, dass die Anlagen zwischen 2030 und 2050 nochmal mehr als verdoppelt werden sollten. Es ist unter diesen Voraussagen unumgänglich eine Strategie zu entwickeln, die eine Photovoltaikzukunft in Österreich gestaltet. Demnach steht das Ziel im Vordergrund, genaue Rahmenbedingungen zu definieren, um eine Akzeptanz in der Gesellschaft aufzubauen. Außerdem sind Ästhetik und Umweltbedingungen, sowie eine hohe nationale Wertschöpfung zu beachten. Dies bedeutet einen maximalen Nutzen für die produzierende Wirtschaft in Österreich. Auch auf den maximalen Nebennutzen soll geachtet werden: So können verschiedene Doppelnutzungen wie zum Beispiel landwirtschaftlicher Anbau unter den PV- Anlagen stattfinden. Der PV- Ausbau soll ein gesamtstaatliches, wirtschaftliches und auch ein zu definierendes ökosozial gewünschtes Optimum erreichen (vgl. Fechner 2020, 7).

Essenziell für die Umstellung der Energiequellen auf erneuerbare Energien und die Erreichung der Ziele der Regierung ist die Anpassung der staatlich vorgegebenen Rahmenbedingungen. Außerdem sind Freiflächen für Photovoltaik in Betracht zu ziehen, um eine gezielte und methodische Planung für die Energiewende zu ermöglichen (vgl. Fechner 2020, 51).

2.1.1.1 Flächenpotentiale Photovoltaik in Österreich

Zur Erhebung der Flächenpotentiale in Österreich wurden mehrere Studien erstellt. Jedoch werden in den meisten Studien nur die technischen Potentiale berücksichtigt (damit ist der Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist, gemeint (vgl. Fechner 2020, 8). Das ökonomische und raumverträgliche Potential einer PV-Ausbaus ist deutlich geringer, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dazu gibt es eine Studie, welche Verteilung der PV-Potentiale untersucht und sie mit den politischen Zielen vergleicht. In dieser Studie wird jedoch rein quantitativ an die Fragestellung herangegangen. Mit festgelegten Parametern, wie der Neigung und der PV-Anlagen, wird die Verteilung und Menge der Anlagen berechnet. Das Ergebnis soll einen Überblick über die Potentiale für den Ausbau von PV-Anlagen geben. Die Auswertung der GIS-Daten zeigt, dass 16,11 TWh an Strom auf Dächern erzeugt werden kann (Mikovits et. al. 2021, 3-12).

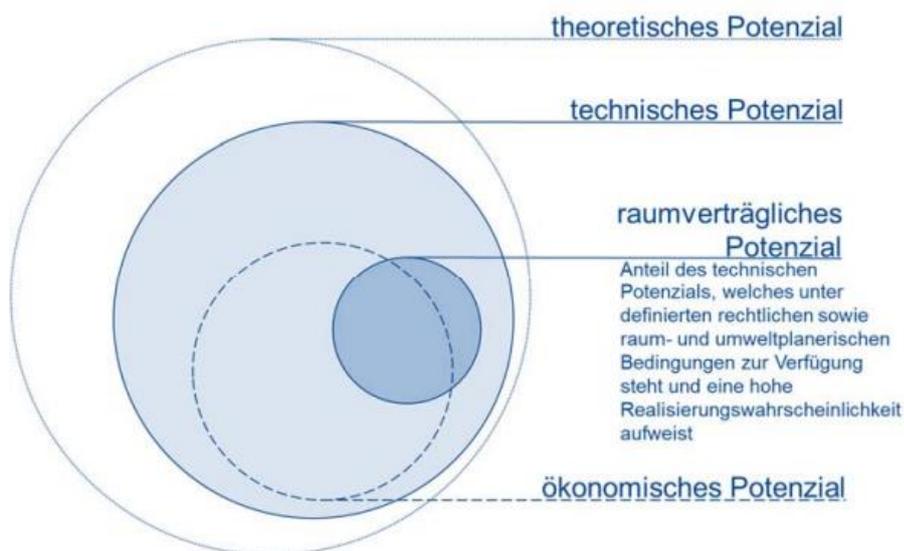


Abbildung 1: PV- Potentiale (Quelle: Kelm et al. 2019, 20)

In einer Studie von Fechner (2020) wird das Potential von Dach PV-Anlagen nur auf 11 TWh berechnet, da weitere Parameter den Potentialen (siehe Abbildung 3) hinzugefügt werden:

- Physikalisch/ technisches Potential: Dies bezieht sich auf das gesamte physikalische Angebot eines Energieträgers im betrachteten Untersuchungsgebiets ohne Berücksichtigung der tatsächlichen nutzungsbedingten Einschränkungen.
- Technisches Potential: Dies ist der Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Dieses Potential steht in Abhängigkeit zu den Normen und Gesetzen.

- Wirtschaftliches Potential: Dieses Potential beeinflusst die Machbarkeit, wenn die Gesamtkosten für die Energieumwandlung einer Energiequelle in der gleichen Bandbreite liegen wie die Kosten konkurrierender Systeme. Die Bestimmung dieses Potentials ist von Annahmen und schwankenden Einflussparametern abhängig (z.B. Strommarktpreis, Zinssatz, Abschreibungsdauer, Preisentwicklungen etc.).
- Erwartetes/ bis 2030 sich realisierendes Potential: Dieses setzt sich aus dem ökologischen und dem sozialen Potential zusammen. Nur wenn auch diese Potentiale erfüllt sind, kann das Projekt realisiert werden.
 - o Ökologisches Potential: Ökologisch ist eine PV-Anlage einzustufen, wenn sie keine zusätzliche dauerhafte und irreversible Beeinträchtigung des Lebensraums in Bezug auf Diversität und Wechselwirkung zwischen Lebewesen, wie auch zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt kommt. Auch die Ästhetik ist ein Element, das nicht im Widerspruch mit diesem Potential stehen soll.
 - o Soziales Potential: Dieses Potential berücksichtigt die positive oder negative Haltung von Individuen oder Gruppen gegenüber einem Energieträger.

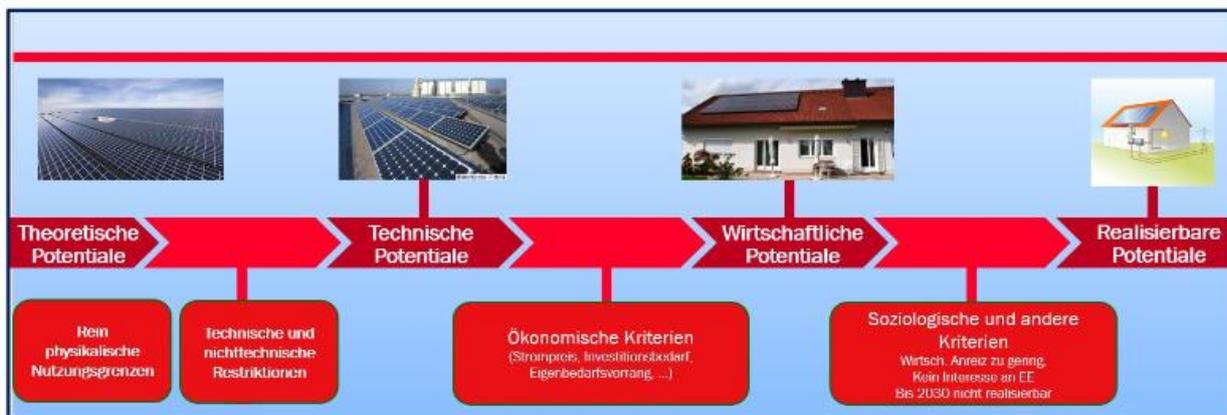


Abbildung 2: PV-Potentiale (Quelle: Fechner 2020, 9)

Die ermittelten Potentiale sind keine unveränderlichen Tatsachen, sie können jedoch mit nur einer kleinen Schwankung bis 2030 angenommen werden.

Aus dieser Studie lässt sich ableiten, dass die aktuellen Potentiale für PV an oder auf Gebäuden - ohne bedeutende Änderung der Rahmenbedingungen - bei weitem nicht ausreichen, um die mittelfristigen Ziele für den PV-Ausbau zu erreichen. So sollten möglichst rasch andere Flächen für die Nutzung von PV-Anlagen in Erwägung gezogen werden. Zu bevorzugen wären Flächen im Nahbereich von infrastrukturell genutzten Gebieten, wie Parkplatzüberdachungen, außerdem Betriebsbau- und Industriegebiete. Darüber hinaus

können vorbelastete Flächen wie Deponien und Lagerflächen für die PV-Anlagen herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Errichtung von V-Anlagen können Flächen mit einer geringen ökologischen Bedeutung, aber auch landwirtschaftliche Flächen sein (Fechner 2020, 52).

2.2 Rechtliche Grundlagen von PV- Anlagen in Österreich

Der Ausbau von Photovoltaik wird in Österreich von rechtlichen Rahmenbedingungen gesteuert. Die Raumplanung ist als vorausschauende Gesamtgestaltung eines bestimmten Gebietes in Gesetzgebung und Vollziehung Landessache (Gruber et al. 2018, 10). Die Planung und räumliche Verteilung von PV-Anlagen ist Teil der Raumplanung, wobei nicht alle Aspekte in der Kompetenz der Länder liegen. Neben den Raumplanungsgesetzen der Länder werden für jedes Land einzelne Naturschutz- und Baurechts-Gesetzblätter herangezogen. Weitere rechtliche Faktoren für die Planung von PV-Anlagen sind das Elektrizitätsgesetz und die Gewerbeordnung. „Als Beitrag zur Verwirklichung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens 2015 und des Ziels der Europäischen Union, den Bruttoenergieverbrauch der Union bis 2030 zu einem Anteil von mindestens 32% durch erneuerbare Energie zu decken, sowie im Bestreben, die Klimaneutralität Österreichs bis 2040 zu erreichen, ist Ziel [...]“ (§4 Abs1 Z1 lit a EAG) des Erneuerbaren- Ausbau- Gesetz EAG.

Im folgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die Genehmigung und räumliche Steuerung aufgrund der oben genannten rechtlichen Grundlagen erläutert.

2.2.1 Bundesrechtliche Rahmenbedingungen

Die Bundesrechtlichen Rahmenbedingungen sind die Grundlagen für den weiteren Ausbau der PV-Anlagen in Österreich. Für die Genehmigungen werden in weiterer Folge landesrechtliche Rahmenbedingungen festgelegt. Die Bundesgesetze haben keine Regelungskompetenz für eine direkte Festlegung oder den Ausschluss von Standorten oder Standorträumen für PV-Anlagen.

Erneuerbares-Ausbau-Gesetz-EAG

Das EAG ist ein Bundesgesetz und gibt Auskunft über den Ausbau von erneuerbaren Energiequellen. Es informiert über die Voraussetzungen des Förderwesens und dessen Regelungen und Steuerung. Das Ziel des Gesetzes ist die Produktion der Energie in Österreich klimaneutral zu gestalten und die Errichtung und Modernisierung der erforderlichen Infrastruktur durch integrierte Planung zu unterstützen (§§3, Abs4 lit a EAG).

Das Erneuerbare- Ausbau- Gesetz sieht zwei Fördersysteme vor, aus denen der Antragsteller wählen kann. Es gibt eine Marktprämie für eingespeisten PV- Strom oder Investitionszuschuss für PV-Anlagen und Stromspeicher (Photovoltaik Austria o.J.)

Für eine Förderung wird im EAG für PV-Anlagen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen oder auf Flächen im Grünland eine spezielle Widmung vorausgesetzt (§10 Abs 1 Z3 lit a EAG). Für Freiflächenanlagen wird gemäß §33 im Vergleich zu gebäudegebundenen Anlagen der Zuschlagswert mit einem Abschlag von 30% versehen.

Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010 –EIWOG 2010

Dieses Gesetz gibt einen Rahmen vor, in welchem Bundesländern ihre Ausführungsgesetze für die Elektrizitätswirtschaft erlassen können. Ziel ist die Weiterentwicklung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Ein weiteres Ziel ist es den Zugang zum Elektrizitätsnetz von erneuerbaren Quellen zu ermöglichen (§4 Abs5 lit a EIWOG).

Gewerbeordnung 1994 – GewO 1994

Angelegenheiten des Gewerbes und der Industrie sind Bundessache in Gesetzgebung und Vollzug. Der Betrieb von Elektrizitätsunternehmen ist zwar vom Geltungsbereich der Gewerbeordnung ausgenommen, jedoch dient die PV-FFA ausschließlich der Deckung des Energiebedarfs eines Gewerbebetriebes, so liegt kein Betrieb durch ein Elektrizitätsunternehmen vor, sondern die Anlage unterliegt dem Betriebsanlagerecht (Koscher 2021, 83) (§2 Abs1 Z20 lit a GweO).

Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP 2000

Die UVP leistet mit einer weitreichenden Beteiligung der Öffentlichkeit einen Betrag für den Umweltschutz und die Akzeptanz von Projekten in Österreich. Aufgabe der UVP ist es auf fachlicher Grundlage die unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen festzustellen und Schutzgüter zu beschreiben und zu bewerten (§1 Abs1 lit a UVP).

PV-Anlagen, vor allem auf Freiflächen, können erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt und deren Verbund haben. Sie stellen eine umfassende Veränderung der Landschaft und des Landschaftsbildes dar. Mit dem Bau von Freiflächen-PV ist in manchen Fällen auch eine geringe Bodenversiegelung verbunden, außerdem führen die Anlagen zu einer Überschattung von Flächen. Zur Wartung und Errichtung der Anlagen müssen notwendige Wege gebaut und technische Einrichtungen errichtet werden. Dies kann die Landschaft erheblich verändern und den Umweltverbund zerschneiden. Dennoch sieht die Errichtung einer PV-Anlage keine Verpflichtung einer UVP vor (ÖKOBÜRO 2021, 1f.).

2.2.2 Landesrechtliche Rahmenbedingungen

Das Raumordnungsrecht gehört der Landesmaterie an und ist bei der Verteilung und Installation von PV-Anlagen von zentraler Bedeutung. Insbesondere für den Genehmigungspfad sind weitere landesrechtliche Gesetze zu beachten. So müssen neben den von den Ländern verordneten Raumordnungsgesetzen auch die Naturschutz- und brauchrechtlichen Richtlinien beachtet werden. Auch die Elektrizitätsgesetze der Länder weichen voneinander ab. In dieser Arbeit wird auf Landesebene nur auf die Gesetzmäßigkeit der Steiermark eingegangen.

Für den Ausbau von erneuerbaren Energien tragen die Bundesländer zumindest 50%, wenn nicht mehr, der Verantwortung. Ohne einer geeigneten Raumordnung und der Erteilung der notwendigen Genehmigungen auf Landesebene ist es nicht möglich einen erneuerbaren Energieträger zu errichten (Baumann et. al. 2021, 120)

Um die Länder- und Bundesziele strategisch auf Landesebene zu vereinen gibt es eine „Klima- und Energiestrategie der Länder“. Idealerweise entspricht die Summe der Länderziele für eine Zielgröße dem Bundesziel. Generell ist anzumerken, dass es von Bundesland zu Bundesland Unterschiede bezüglich des Anteils erneuerbarer Energieträger gibt. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern hat in allen Bundesländern, außer in Wien, den größten Anteil an der Stromproduktion. In Wien kommen 86 % des Stroms aus fossilen Energieträgern und Importen. Im Vergleich dazu kommen in der Steiermark etwas weniger als die Hälfte des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen. Um das Klimaziel, 100% nachhaltigen Strom in Österreich zu erzeugen, zu erreichen, wird dem Land Steiermark das Ziel aufgetragen, weitere 1,9 TWh mit Photovoltaikanlagen zu produzieren. Dies basiert auf einem Vorschlag für eine potentialbasierte Aufteilung des zusätzlichen Erzeugungsbedarf (Baumann et. al. 2021, 3 ff.).

Die Bundesländer haben unterdessen ihre eigenen strategischen Aktivitäten, um die Energiewende in Angriff zu nehmen. Die Steiermark formuliert eine „Klima- und Energiestrategie Steiermark 2030“ (Baumann et. al. 2021, 18.).

Die Länder setzen Rahmenbedingungen einerseits durch gesetzliche Vorgaben, andererseits mit Genehmigungen, Unterstützungs- und Förderungsprogrammen, sowie im Bereich der Raumordnung und des Naturschutzes (Baumann et. al. 2021, 86).

In dem folgenden Kapitel wird vor allem auf die gesetzlichen und raumordnungsrelevanten Rahmenbedingungen eingegangen. Die Förderprogramme, haben im Zusammenhang mit der Verteilung und Machbarkeit der PV- Anlagen keine Relevanz.

2.2.3 Strategien und gesetzliche Voraussetzungen in der Steiermark

Die im Kapitel der Methodik folgenden Beispiele zur Analyse der Flächen bezieht sich auf zwei repräsentative Gemeinden in der Steiermark. Daher wird in diesem Kapitel auf Landesebene nur auf die Steiermark eingegangen, um die Ergebnisse in der Analyse der Gemeinden heranziehen zu können.

Die Genehmigung einer PV-Anlage in der Steiermark sowohl in der Freifläche als auch auf Gebäuden unterliegt dem Elektrizitätsrecht, Naturschutzrecht, Baurecht und dem Raumordnungsrecht. Neben den rechtlichen Grundlagen bedient sich die Steiermark strategischer Instrumente. Zusätzlich zur überörtlichen und örtlichen Raumplanung definiert die Steiermark Leitfäden für die Strategie des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen. Weitere Leitfäden gehen genauer auf den Ausbau und den Einsatz von PV-Anlagen ein. Jedoch spezialisieren sich die Leitfäden und Gesetzmäßigkeiten der Steiermark Großteiles auf die PV-Freiflächenanlagen.

2.2.3.1 Elektrizitätsrecht

„Dieses Gesetz regelt die Erzeugung, Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie in der Steiermark.“ (§1 Abs1 Z1 lit a EIWOG) Das Steiermärkische Elektrizitätswirtschafts und -organisationsgesetz setzt fest, dass alle Anlagen mit einer elektrischen Engpassleitung von mehr als 200kW genehmigungspflichtig sind (§5 Abs2 Z1 lit a EIWOG). Im § 10 der Stmk EIWOG 2005 sind die Voraussetzungen für die Erteilung einer Genehmigung ausgeführt. Neben dem Schutz von Leben, Gesundheit, Eigentum und dinglichen Rechten sowie vor unzumutbaren Belästigungen der AnrainerInnen ist die Beschränkung der Beeinträchtigung öffentlicher Interessen auf ein zumutbares Maß genannt. Zu diesen öffentlichen Interessen zählen u.a. die Raumordnung und der Naturschutz. Bestimmungen über eine Widerspruchsfreiheit mit dem Flächenwidmungsplan oder eine Abstimmung mit der Raumordnung existieren in diesem Gesetzblatt nicht (Koscher 2021, 107f.).

2.2.3.2 Naturschutzrecht

Die naturschutzrechtlichen Gesetztestexte beziehen sich nur auf PV-Anlagen in der Freifläche, da sie sich auf schützenswerte Flächen und Schutzgebiete bezieht. Im steirischen Naturschutzgesetz 2017 (StNSchG 2017) werden die Bewilligungserfordernisse für Bauten und PV- Anlagen auf Freiflächen ausgeführt. In den allgemeinen Zielen des Naturschutzgesetzes der Steiermark 2017 steht: „Die Natur soll in allen ihren Erscheinungsformen und Wechselwirkungen als Daseinsgrundlage aller Lebewesen nur so weit in Anspruch genommen werden, dass sie für nachfolgende Generationen unter

Berücksichtigung der Erholungswirkung und nachhaltiger Nutzungen des Naturraumes erhalten bleibt.“ (§2 Abs1 Z1 lit a StNSchG 2017).

Eine Bewilligungspflicht besteht bei der Errichtung von Bauten und Anlagen jedoch nur, wenn diese in einem Landschaftsschutzgebiet außerhalb der geschlossenen Ortschaft liegen (§8 Abs1 Z3 lit a StNSchG 2017).

Geschützte Landschaftsteile oder Naturdenkmäler müssen eine Anzeige über ihr Vorhaben erstatten, welche eine behördliche Prüfung auf Einhaltung des jeweiligen Schutzzweckes nach sich zieht (§13 Abs 1 Z1fff. lit a StNSchG 2017)

2.2.3.3 Baurecht

In der Bauvorschrift für das Land Steiermark (Steiermärkisches Baugesetz–Stmk. BauG) gelten Solar- und Photovoltaikanlagen als baubewilligungspflichtig, wenn die Brutto-Fläche mehr als 400 m² hat und eine Höhe von 3,50 m überschreitet. Unter diesen Maßen ist ein bewilligungspflichtiges Vorhaben im vereinfachten Verfahren vorzusehen sowie eine Meldepflicht der Anlage (§19 Abs 1 Z5 lit a Stmk. BauG) (§20 Abs 1 Z2 lit a Stmk. BauG) (§21 Abs 1 Z2 lit a Stmk. BauG). Diese Richtlinien gelten sowohl für gebäudegebundene sowie Freiflächen-Photovoltaik.

Außerdem sieht das Steiermärkische Baugesetz im §80b eine Verpflichtung der Installation von Photovoltaikanlagen auf Neubauten von Wohngebäuden bei einer Brutto-Grundfläche von über 100m² vor. Dabei sind je angefangener 100m² konditionierter Brutto-Grundfläche Photovoltaikanlagen mit einer Fläche von mindestens 3 m³ anzubringen. Bei Neubauten von Gebäuden, die nicht der Wohnnutzung dienen, sind mit einer oberirdischen Bruttogeschoßfläche von mehr als 250 m² Solaranlagen zu installieren. Dabei sind je angefangener 100 m² oberirdischer Dachfläche eine Photovoltaikanlage von mindestens 6 m² anzubringen. Das Gesetz schreibt auch die Pflicht der Errichtung einer Photovoltaikanlage auf Neubauten von überdachten Bauwerken vor. Dabei sind je angefangenen 100 m² oberirdischer Dachfläche Photovoltaikanlagen von mindestens 6 m² anzubringen (§80b lit a Stmk. BauG).

2.2.3.4 Raumordnungsrecht

Das Steiermärkische Raumordnungsgesetz 2010 (StRoG) sichert eine planmäßige, vorausschauende Gestaltung eines Gebietes, um die nachhaltige und bestmögliche Nutzung und Sicherung des Lebensraumes im Interesse des Gemeinwohles zu gewährleisten (§1 Abs 2 Z1 lit a StROG).

In der überörtlichen Raumordnung der Steiermark werden vor allem die Grundlagen- und Raumforschung eingesetzt: Insbesondere Bestandsaufnahmen und die Festlegung von Methodik und Monitoring (§10 Abs 1 Z1 lit a StROG). Die Festlegung von Standorten für PV-Anlagen fällt in die Aufgabe der örtlichen Raumordnung. Diese handelt im Wirkungsbereich der Gemeinde auf Grundlage der Bestandsaufnahme und der Raumordnungsgrundsätze des Gemeindegebiets. Die Instrumente der örtlichen Raumordnung sind: das örtliche Entwicklungskonzept mit dem Entwicklungsplan, der Flächenwidmungsplan und der Bebauungsplan (Amt der Steiermärkischen Landesregierung s.a.). Diese Planungsinstrumente gelten speziell für PV-Freiflächenanlagen. Im Flächenwidmungsplan müssen die Versorgungsanlagen von Photovoltaikanlagen, vor allem wenn sie von überörtlicher Bedeutung sind, gekennzeichnet sein (§26 Abs 7 Z1 lit a StROG).

Im StROG wird außerdem festgelegt, dass die Baubewilligungen nach dem STmK. BauG sowie Bewilligungen nach StROG und Verordnungen sich nicht widersprechen. Demnach gilt für PV- Freiflächenanlagen mit mehr als 100m² Kollektorfläche Widerspruchsfreiheit mit dem Flächenwidmungsplan, Bebauungsplan sowie dem örtlichen Entwicklungskonzepten und überörtlichen Entwicklungsprogrammen (Koscher 2021, 111).

Generell sind für die Planung und Errichtung von PV-Anlagen folgende Raumordnungsgrundsätze relevant:

- Die Qualität der natürlichen Lebensgrundlagen ist zu erhalten und wenn möglich sogar zu verbessern.
- Eine sparsame Nutzung der Fläche soll angestrebt werden und Zersiedelung der Landschaft ist zu vermeiden.
- Ökologische, Wirtschaftliche und soziale Tragfähigkeit der Siedlungsstruktur soll berücksichtigt werden.
- Die Berücksichtigung der Klimaschutzziele bei der Entwicklung der Siedlungsstruktur werden berücksichtigt.
- Schutz vor Beeinträchtigungen und Erhaltung der Landschaft, insbesondere von Gebieten mit einer charakteristischen Kulturlandschaft oder ökologisch bedeutsamen Struktur. Raumbedeutsame Planungen und Maßnahmen aller Gebietskörperschaften sind aufeinander abzustimmen (Gießler 2011, 37).

Das Raumordnungsgesetz bezieht sich auf PV-Freiflächenanlagen und hat nur wenig bis keine Berührungspunkte mit gebäudeintegrierten PV-Anlagen, da diese kaum bis keinen Einfluss auf Umwelt und Siedlungsverband haben. Nur die Wahrung des Ortsbildes kann für beide Anlagentypen von Wichtigkeit sein.

2.2.3.5 Strategische Leitfäden zur Errichtung von PV-Anlagen

In Bezug auf PV-Anlagen gibt es Leitfäden, welche sich entweder direkt auf das Land Steiermark beziehen oder grundlegende Voraussetzungen für die Installation von PV-Anlagen geben. Die Leitfäden der Steiermark konzentrieren sich auf PV-Freiflächenanlagen, daher wird in dieser Arbeit der Solarleitfaden der Stadt Wien für eine nähere Erläuterung der gebäudeintegrierten PV herangezogen.

Klima- und Energiestrategie Steiermark 2030- Aktionsplan 2019- 2021

Im Aktionsplan der Steiermark wird strategisch auf die EU-Strategie einer Dekarbonisierung reagiert. Neben der Senkung der Treibhausgasemissionen und der Steigerung der Energieeffizienz, soll der Anteil der erneuerbaren Energie auf 40% gesteigert werden (Gössinger- Wieser 2019, 5).

In Bezug auf die Energieaufbringung und -versorgung wird in der Klima- und Energiestrategie der Steiermark 2030 auf 3 Schwerpunkten aufgebaut und es werden Ziele definiert:

- Effizienzsteigerung in der Energieversorgung: „Die Effizienz der gesamten Energieversorgung von der Aufbringung bis zur Verteilung erhöhen, die Infrastruktur an die neuen Herausforderungen anpassen, und die Speichermöglichkeiten ausbauen.“ (Gössinger- Wieser 2019, 5)
- Erneuerbare Energie weiter ausbauen
- Versorgungssicherheit (Gössinger- Wieser 2019, 5)

Im Zusammenhang mit dem PV-Ausbau unterstützt der Leitfaden den Ausbau des Stromnetzes, den dezentralen Stromspeicher und die Förderung innovativer Photovoltaiknutzung. In der Photovoltaiknutzung werden innovative Ansätze hervorgehoben, zum Beispiel PV-Gemeinschaftsanlagen an Bestandsobjekten. Dies gibt die Möglichkeit den Eigenverbrauch zu optimieren und damit die Stromversorgung in der Steiermark noch weiter zu stabilisieren (Gössinger- Wieser 2019, 36). Generell sollen die landesgesetzlichen Rahmenbedingungen auf mögliche Hürden geprüft und somit die Errichtung von PV-Anlagen erleichtert werden (Gössinger- Wieser 2019, 66).

Der Aktionsplan der Steiermark geht jedoch nicht näher auf die Errichtung der Photovoltaik ein und gibt somit nur ein grobes Grundgerüst für eine weitere Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele der Energiewende vor.

Raumplanung Steiermark- Photovoltaik Freiflächenanlagen Leitfaden für Raumplanungsverfahren

Der Leitfaden für PV-Freiflächenanlagen in der Steiermark dient als Grundlage zur Erstellung von Rahmenvorgaben sowohl für die planende Gemeinde, die Aufsichtsbehörde, aber auch als Orientierungshilfe für potenzielle Investoren. Er ist eine Sammlung von Handlungsempfehlungen und gibt zusätzlich Hilfestellungen bei der Beurteilung von Auswirkungen, sowie unterstützt Abwägungsprozesse möglicher Konfliktpotentiale. Zusätzlich dient der Leitfaden als Orientierungshilfe bei der Standortsuche von PV-Freiflächenanlagen für Gemeinden und die Aufsichtsbehörde. Es werden Bereiche in der Steiermark definiert, welche für die Errichtung von PV-Freiflächen aus raumplanerischer und naturschutzfachlicher Sicht geeignet sind, und auch in welchen ein hohes Konfliktpotential besteht (Gießler 2011, 9).

Die PV-Freiflächenanlagen sollen laut des steirischen Leitfadens aus Kostengründen unterstützt werden. Es gibt einen Trend zur Zentralisierung von PV-Anlagen und somit zu Großanlagen. Auf großen Hallendächern ist der Bau großflächiger PV-Anlagen einerseits aus statischer Sicht und andererseits auf Grund der langen Laufzeit der Anlagen über den Zeitraum von mindestens 25 Jahren eingeschränkt, was lange Pachtverhältnisse und damit eine Limitierung für die Hallennutzung bedeutet. Mit diesen Hindernissen wird der Einsatz von PV-Freiflächenanlagen für die Zukunft beworben. Der Zuwachs von Freiflächenanlagen soll in Verbindung mit den Vorgaben der Raumordnungsgrundsätze und den Zielen hinsichtlich von landschaftlichen und naturschutzbezogenen Schutzgütern stehen (Gießler 2011, 8). Im Zusammenhang mit dem überörtlichen und örtlichen Raumplanungsverfahren ist der Leitfaden eine Orientierungshilfe. Der Analyseschwerpunkt liegt auch aus den angegebenen Gründen bei den PV-Freiflächenanlagen. Vorgaben für gebäudeintegrierte PV sind dem Baugesetz zugeordnet. Sie können in Raumplanungsverfahren nur bedingt behandelt werden (Gießler 2011, 19). Bei der Standortwahl wird sowohl Freiflächen- als auch gebäudeintegrierte PV berücksichtigt und miteinander abgewogen.

In Bezug auf die Lage- und Standortbedingungen, beziehungsweise die Voraussetzungen von PV-Anlagen, ist der Einstrahlungswert je nach geografischem Standort von Bedeutung. Für Österreich gilt, dass die Einstrahlungswerte und somit auch die Einträge von Nord nach Süd zunehmen. Zusätzlich gibt es regionale Besonderheiten, welche für die Standortwahl ausschlaggebend sind. Zum Beispiel Nebelbildung oder unreine Luft in Becken oder in Flussnähe. Ein weiteres Kriterium ist die Höhe über dem Meeresspiegel. Eine PV-Anlage hat höhere Erträge, wenn die Umgebungstemperatur niedriger ist. Im Regelfall verringert sich die Temperatur mit zunehmender Höhe, demnach ist mit höheren Einträgen in höher gelegenen Regionen zu rechnen (Gießler 2011, 18).

Für die Errichtung und die Standortwahl von PV-Anlagen sind zusätzlich umweltrelevante Wirkungsprofile zu erstellen. Generell relevante Wirkfaktoren sowie mögliche

schutzgutbezogene Umweltauswirkungen sind zu berücksichtigen. Ausschlaggebend für die Projektwirkung der PV-Anlagen ist Größe und Lage, sowie die naturräumlichen und anthropogenen Voraussetzungen des Projektes. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch die Art der PV-Anlage. Grundsätzlich beschreibt der Leitfaden eine höhere Beeinträchtigung der Umwelt durch PV-Freiflächenanlagen als bei gebäudeintegrierten PV-Anlagen. Der Leitfaden der Steiermark definiert in diesem Zusammenhang schutzgutübergreifende Wirkungsfaktoren und schutzgutbezogene Umweltauswirkungen von PV-Freiflächenanlagen (Gießler 2011, 19).

Die Wirkungsmatrix zeigt, dass bei einem strategischen Vorgehen bei der Standortwahl schon im Vorfeld ein Großteil an Konflikten vermieden werden kann. Außerdem beschreibt die Matrix konkrete Unterschiede der Konfliktpotentiale von gebäudeintegrierter und Freiflächen-PV. Im Wirkungsprofil der gebäudeintegrierten PV-Anlagen sind „Visuelle Wahrnehmbarkeit“ und „Licht, Reflexionen“ relevant. In der Freifläche spielen mehrere Faktoren bei der Standortwahl einer PV-Anlage eine Rolle. Speziell im Themenbereich „Landschaftsbild/ Erholung“ gibt es dauerhafte Wirkungen auf den Flächenverbrauch, die Veränderung der Vegetationsstruktur, die Überdeckung des Bodens und die visuelle Wahrnehmung. Bei der Wahl des Standortes in der Freifläche werden diese Wirkungsfaktoren berücksichtigt, um Konfliktpotentiale zu verringern.

Neben der Wirkungsmatrix werden räumliche Konflikte- oder Synergiepotentiale sowie raumrelevante Nutzungsbestimmungen und landschaftsplanerische Beurteilungskriterien als Grundlage der Standortplanung herangezogen.

Zu beachten sind auch die energiewirtschaftlichen Aspekte bei der Standortwahl von PV-Anlagen. Sofern keine nachteilige Beschattung der Module auftritt, sind PV-Anlagen aus technischer Sicht kaum bis nicht standortgebunden. Die Eignung eines Standortes, vor allem für Freiflächen-PV, ergibt sich meist aus den landschaftsbildlichen und ökologischen Sensibilitäten der Projektgebiete. Die Entscheidung über einen Standort setzt sich außerdem aus Kriterien wie Infrastruktur, optimale Nutzungsbedingungen (Beschattung und Einstrahlwinkel), Akzeptanz und Eigentumsverhältnisse zusammen (Gießler 2011, 47).

„Eine sorgfältige Standortwahl ist ausschlaggebend für die umweltverträgliche und richtlinienkonforme Umsetzung einer PV-Freiflächenanlage. Die richtige Standortwahl hilft die Beeinträchtigung der Umwelt möglichst geringzuhalten sowie Kosten und Zeit für das Genehmigungsverfahren zu sparen.“ (Gießler 2011, 47) Die Standortwahl bei gebäudeintegrierten PV-Anlagen stützt sich auf die technischen Gegebenheiten der Gebäude und deren Eigentumsverhältnisse. Bei Freiflächen PV ist auf die Auswirkung auf die Natur und den Siedlungsverband, sowie auf das Landschaftsbild zu achten. Die Abwägung der Wirkungsfaktoren und der oben genannten Themenbereiche können zu einer strategischen und zielgerichteten Planung und Standortwahl beitragen.

Leitfaden zur Standortplanung und Standortprüfung für PV-Freiflächenanlagen-Steiermark

Der Leitfaden zur Standortplanung und -prüfung für PV-Freiflächenanlagen in der Steiermark gibt eine genaue Vorgehensweise bei der Standortplanung von PV-Anlagen vor.

Beim Raumplanungsverfahren zur Standortprüfung von PV-Freiflächenanlagen werden zur Beurteilung des Konfliktpotentials Listen herangezogen und eine konkrete Vorgehensweise eingehalten.

Die Grundsätze zur Standortplanung und -prüfung von PV-Freiflächenanlagen werden im „Leitfaden für Raumplanungsverfahren“ für PV-Anlagen in der Steiermark näher erläutert. Entscheidungen werden einerseits auf Basis von energiewirtschaftlichen und technischen Grundlagen und andererseits aus Sicht der Raumplanung und Umweltwirkung getroffen. Energiewirtschaftliche Standortkriterien im Rahmen der Standortplanung beinhalten Infrastruktur, Lage im Landschafts- und/ oder Naturraum und Zusammenarbeit mit den Zielen des örtlichen Entwicklungskonzeptes (ÖEK). Aus raumplanerischer Sicht werden vorrangig Kriterien wie Bodenverdichtung, Lebensraumveränderung, Barrierewirkung und visuelle Beeinträchtigungen bearbeitet (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2020, 9).

Laut dem Leitfaden zur Standortplanung von PV-Freiflächenanlagen sind demnach folgende Standortkriterien und Planungsgrundsätze bedeutend:

- Vermeidung räumlicher Nutzungskonflikte
- Vermeidung der weiteren Fragmentierung und „Zerschneidung“ des freien Landschaftsraumes → Zielsetzung: Errichtung der Anlage vorzugsweise innerhalb des Siedlungsverbundes oder im Anschluss daran.
- Möglichst geringe Beeinträchtigung von Natur- und Landschaftsräumen (inkl. deren Erholungs- und Erlebniswert) sowie des Orts-, Straßen- und Landschaftsbildes bei PV-Freiflächenanlagen außerhalb des Siedlungsverbundes.“ (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2020, 10)

Bei der Suche nach einem geeigneten Standort für die PV-Freiflächenanlage ist ebenfalls nach einer Reihenfolge vorzugehen. Zu bevorzugen sind Standorte im Siedlungsverbund, welche sich baulich im Siedlungsbereich befinden. Wenn im Siedlungsverband keine geeigneten Flächen vorhanden sind, werden Flächen in Anbindung zum bestehenden Siedlungsverbund in Betracht gezogen. Dies sind meist Flächen, die im räumlichen Zusammenhang mit größeren Gewerbe- und Industriegebieten stehen. Zuletzt werden vorbelastete Flächen oder Flächen mit geringer Sensibilität des Siedlungsverbundes für den PV-Ausbau im Freiraum herangezogen (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2020, 10).

Der Leitfaden gibt konkrete Standortbedingungen und -prüfmöglichkeiten für PV-Standorte vor und fasst diese zusammen. Gebäudeintegrierte PV-Anlagen werden nur in Bezug auf ihre Eignungsbereiche erwähnt. Diese sind vorrangig große Dachflächen wie zum Beispiel auf Gewerbe- und Industriebauten oder Kläranlagen (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2020, 11).

Solarleitfaden-Leitfaden für Solaranlagen (Stadt Wien)

Der Solarleitfaden der Stadt Wien setzt sich vor allem mit gebäudeintegrierter Photovoltaik auseinander. Diese spielt eine wichtige Rolle in der Energiewende und auf dem Weg zur Klimaneutralität. Zusätzlich haben sich in den vergangenen Jahrzehnten die Nutzungsansprüche in städtischen Gebäudelandschaften stark verändert. Durch fortschreitende Flächenversiegelung entstehen urbane Hitzeinseln und Verdunstung von Wasser wird vermindert. Mit einer Kombination von Solaranlagen und Bauwerksbegrünung können stadtklimatische und energietechnische Bedürfnisse abgedeckt werden. „Zur Bewältigung zukünftiger klimatischer und energetischer Herausforderungen im urbanen Raum werden Anwendungen benötigt, die Synergien zwischen den Solar- und Photovoltaik-Technologien und der „Grünen Stadt“ mit naturbasierten Lösungen bieten können.“ (Stadt Wien 2021, 10) Der Leitfaden trägt durch die Kombination von Technologie und Natur zu einer optimalen Nutzung der Sonnenenergie und einer Verbesserung des Stadtklimas bei.

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel spielt es eine zentrale Rolle, stark bebaute urbane Gebiete zu adaptieren, um Lebensqualität für die Zukunft zu garantieren. Mit einer effektiven Nutzung der Gebäudeoberflächen durch PV-Anlagen und Begrünung, können die Effekte des Klimawandels und der Ressourcenverbrauch vermindert werden. In urbanen Arealen können nicht nur auf Gebäuden, sondern auch auf Plätzen, PV-Anlagen als Beschattung herangezogen werden. Auch für die Agro- Photovoltaik kann die Beschattung der Pflanzen von Vorteil für den Ertrag der Feldfrüchte sein (Sattler et al. 2020, 24f.).

Zusätzlich kann durch die Synergie von Bauwerksbegrünungen und Solartechnologien die Effizienz und der Ertrag der PV-Anlage nochmals gesteigert werden. Mit einer Hintergrünung und somit einer Kühlung der PV-Anlage wird die Leistung der Paneele gesteigert. Außerdem hat die partielle Verschattung des Gründachs eine positive Auswirkung auf den Artenreichtum der Bepflanzung (Stadt Wien 2021,11). Um die Kühlung der Module und das Pflanzenwachstum zu optimieren, ist es wichtig einen festgelegten Abstand zwischen der Vegetationsschicht und dem Modul einzuhalten. Der Mindestabstand liegt zwischen 20 und 60 cm, abhängig von System, Neigung und Windlast (Stadt Wien 2021, 95).

Einen weiteren Einfluss auf die Planung haben Gebäudetypologie, Nutzung und Eigentumsverhältnisse. Die Typologie des Gebäudes spielt eine tragende Rolle bei den

Nutzungsmöglichkeiten. So gilt es detaillierte Nutzungs- und Ertragsziele für die verfügbare Fläche zu definieren. Eigentumsverhältnisse sind ebenfalls von Bedeutung. Bei Wohnungseigentum müssen mindestens 51% der der Besitzer der Errichtung einer PV-Anlage zustimmen und bei schlichtem Miteigentum müssen es 100% sein (Stadt Wien 2021, 98).

Der Solarleitfaden der Stadt Wien unterscheidet sich stark von den Leitfäden zu Freiflächen PV-Anlagen in der Steiermark. Er setzt sich mit dem Thema Integration von Natur und Klimathemen auseinander, während bei den Leitfäden zu Freiflächenphotovoltaik meist die Konflikte zwischen Landschaftsbild und Natur aufgezeigt werden.

Zusammenfassung der Leitfäden

Die Leitfäden der Steiermark setzten sich zu einem großen Teil mit den PV-Freiflächenanlagen auseinander.

Der Aktionsplan der Steiermark 2019- 2021 hat die Förderung von innovativer PV-Nutzung zum Ziel. Außerdem soll die Stromversorgung gesichert und die Errichtung von PV-Anlagen erleichtern werden. Der Aktionsplan gibt eine grobe Einschätzung über Ziele der Energiewende und des PV-Ausbaus.

Der Leitfaden für Raumplanungsverfahren für PV-Anlagen in der Steiermark ist ein Instrument für die Planung und ist eine Handlungsempfehlung sowie eine Hilfestellung bei der Standortwahl von PV-Anlagen und deren Auswirkungen. Dieser Leitfaden ist eine Orientierungshilfe für die Entscheidungsträger bei der Standortsuche von PV-Freiflächenanalgen. In diesem Zusammenhang wird eine Abwägung zwischen Gebäude- und Freiflächenphotovoltaik vorgenommen. Bei der Standortwahl werden umweltrelevante Wirkungsprofile erstellt. Diese sind abhängig von Lage und Größe der Anlage, sowie naturräumlichen und anthropogenen Voraussetzungen.

An einem konkreten Standort kann mit dem Leitfaden zur Standortwahl und Standortprüfung der Ort der PV-Anlage anhand von Prüflisten begutachtet werden. So können Konflikte vorab vermieden werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf einer Vermeidung der Fragmentierung der Landschaft und auf einer geringen Beeinträchtigung von Natur und Landschaft.

Der Solarleitfaden der Stadt Wien setzt sich, anders als die Leitfäden der Steiermark, zum Großteil mit gebäudegebundenen PV-Anlagen auseinander. Außerdem werden in diesem Leitfaden vorrangig die Potentiale der Technologie und ihre möglichen Nutzungen aufgezeigt. In Verbindung mit der Fassaden- und Dachbegrünung wird der Vorteil für PV-Anlagen und Stadtklima beschrieben.

Auch in der Freifläche kann eine PV-Anlage von Nutzen für die Landwirtschaft sein. Die Flächenkonkurrenz kann durch eine doppelte Nutzung der Flächen entschärft werden. Durch die Überdachung der Ackerflächen kann das Feld vor Hagel-, Frost und Dürreschäden besser geschützt werden. Außerdem kann der Bewässerungsbedarf bis zu 20% reduziert werden und Regenwasser für Bewässerung gesammelt werden. Ein weiterer Vorteil ist eine Optimierung der Lichtverfügbarkeit für die Ackerkulturen, so kann die Effizienz des Ackers gesteigert werden (Trommsdorff et al. 2020, 4ff.).

Im Planungsverfahren für die Wahl eines Standorts einer PV-Anlage sind Vor- und Nachteile abzuwägen. Der ökologische Fußabdruck der Aufbauten und Konstruktionen der Anlagen wird in den Leitfäden nicht berücksichtigt. Der Fokus liegt auf der Ökologie, dem Landschaftsbild und der Wirtschaftlichkeit. In den Leitfäden der Steiermark liegt der Fokus darauf, das Konfliktpotential zu minimieren, dabei wird der positive Effekt der Photovoltaik, vor allem in der Freifläche, völlig außer Acht gelassen und spielt keine Rolle bei der Standortwahl.

2.2.4 Gesetzmäßigkeiten auf Gemeindeebene in der Steiermark

Auf Gemeindeebene ist die örtliche Raumplanung für die Planung und Entwicklung zuständig. Die örtliche Raumplanung hat die Aufgabe auf Grundlage der Bestandsaufnahme die örtliche zusammenfassende Planung für eine den Raumordnungsgrundsätzen entsprechende Ordnung des Gemeindegebietes aufzustellen und der Entwicklung anzupassen. Die örtliche Raumplanung liegt im Wirkungsbereich der jeweiligen Gemeinde. Das Land Steiermark begleitet und prüft dabei die Planung der Gemeinden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung o.j.).

Die örtliche Raumplanung bedient sich folgender Instrumente:

- das örtliche Entwicklungskonzept mit dem Entwicklungsplan
- der Flächenwidmungsplan
- der Bebauungsplan

Diese Instrumente bilden die Entwicklungsgrundlage für die Gemeinden. So können Ziele geplant und strategisch abgewickelt werden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung o.j.).

Für den Bau von PV-Anlagen sind Entwicklungskonzept, Flächenwidmungsplan und Bebauungsplan aus planerischer Sicht von Bedeutung. In Zusammenarbeit mit den Zielen der Gemeinde, kann ein nachhaltiges Konzept für den PV-Ausbau entstehen.

Auf Gemeindeebene wird weiters auf die Gemeinden Weiz und Thannhausen eingegangen, da diese im Kapitel 3 der Methodik als Beispiele herangezogen werden. Zu Beginn werden die rechtlichen Rahmenbedingungen dieser Gemeinden geprüft.

2.2.4.1 Rahmenbedingungen der Gemeinde Weiz und Thannhausen

Die Gemeinde Weiz hat eine lange Geschichte, die bis ins 11. Jahrhundert zurückreicht. Die Stadt zählt 2022 12.730 Einwohner (Stadtgemeinde Weiz 2022). Die Gemeinde Thannhausen hat eine Bevölkerung von 2.434 Einwohnern (Gemeindeamt Thannhausen o.j.) Es gibt nur zu Weiz ein Entwicklungskonzept. In Thannhausen liegt als Information nur der Flächenwidmungsplan vor.

Im Bereich erneuerbarer Energie ist Weiz seit 1994 tätig. In diesem Jahr wird die „Energierregion Weiz- Gleisdorf“ gegründet. Im Jahr 2014 wird Weiz zur „Klima- und Energiemodellregion“ ernannt und 2015 erfolgt der Zusammenschluss mit dem Almenland zur „Almenland & Energierregion Weiz- Gleisdorf“ (SEK Weiz 2016, 6).

Im Stadtentwicklungskonzept der Gemeinde Weiz wird auf die Installation von PV-Anlagen hingewiesen. Diese sollen, laut Konzept, vorrangig an Dachflächen angebracht oder in den Baukörper integriert werden (SEK Weiz 2016, 29). PV-Anlagen sollen nicht lediglich als technische Anlagen behandelt, sondern als gestalterisches und architektonisches Element in die Projekterarbeitung einbezogen werden. Wegen des Stadtbildes sollen PV-Anlagen vorrangig an Nebengebäuden oder auf der von Straße- und Platzraum abgewandten Seite angebracht werden (SEK Weiz 2016, 48f.). Auf PV-Anlagen in der Freifläche wird im Stadtentwicklungskonzept nicht eingegangen.

2.3 Nutzungskonflikte

Bei der Standortplanung von PV-Anlagen wird auf Grund der Vielzahl an Nutzungskonflikten in der Freifläche gebäudeintegrierte PV bevorzugt. In der Freifläche sind Aspekte der Energiewirtschaft, der Raumplanung, des Natur- und Artenschutzes und des Orts- und Landschaftsbildes zu berücksichtigen. Aber auch gebäudeintegrierte PV-Anlagen können in Konkurrenz mit dem Ortsbild stehen. Daher sind PV-Anlagen auf betrieblich genutzten Flächen vorzuziehen. Letztere müssen statisch geprüft werden. (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 2020, 13 ff.).

Bei PV-Freiflächenanlagen sind große Anlagen aus energietechnischen und infrastrukturellen Gründen zu bevorzugen. Jedoch wachsen proportional mit der Größe und Art der Anlage die Konflikte. Große PV-Anlagen werden emotional und subjektiv bewertet, auch wenn es konkrete Vorgaben zur Bewertung des Eingriffes in die Landschaft gibt. Allerdings gehen die Meinungen hinsichtlich des Weges zum Erreichen der CO₂-Neutralität und somit eines hohen Solarstromanteils auseinander. Es entsteht Konfliktpotential zwischen den Meinungen der BürgerInnen, des Landschaftsschutzes, der Effizienz und den Vorgaben der Regierung (Späth 2018, 435).

Generell kann zwischen hohem, mittlerem und geringem Konfliktpotential unterschieden werden. Bei einem hohen Konfliktpotential sind die Erhaltungs- und Entwicklungsziele der Schutzgüter und die geplante räumliche Entwicklung mit der Wirkung der PV-Freiflächenanlagen nicht vereinbar. Bei geringem Konfliktpotential sind sie vereinbar und die PV-Anlage kann gebaut werden. Flächen mit geringem Konfliktpotential befinden sich laut dem Leitfaden zu Freiflächen PV vor allem in Bereichen von Industrie und Gewerbe (Gießler 2011, 25).

Im Freiraum besteht ein Konflikt zwischen PV-Anlagen und dem Landschaftsbild, der Kultur und der Erholungsnutzung der Landschaft. So kann die Errichtung von PV-Anlagen in Konflikt mit dem regionalen Entwicklungsprogramm stehen. Dabei geht es vor allem um die Berücksichtigung von Vorrangzonen für Siedlungsentwicklung und Landwirtschaft (Gießler 2011, 38).

Konflikte können durch eine überlegte und strategische Planung reduziert und vermieden werden. Der emotionale Aspekt bei der Errichtung von PV-Anlagen ist jedoch kaum einzuschätzen, soll aber wenn möglich berücksichtigt werden.

2.4 Technische Grundlage von PV-Anlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten technischen Voraussetzungen von PV-Anlagen erläutert und zusammengefasst. PV-Module wandeln Solarstrahlung direkt in Strom um, ohne einer dazwischengeschalteten Wärmekraftmaschine oder rotierenden Ausrüstung. (Kalogirou 2009, 469).

Die PV-Anlagen können von kleinen Verbrauchern wie der Hausbeleuchtung bis hin zur direkten Einspeisung elektrischer Energie in das Stromnetz aus einer großen PV-Modulanlage reichen. Trotz ihrer Größe und Verwendung ist die grundlegende Systemkonfiguration relativ einfach. Jedes System besteht aus PV-Paneelen, die eine Sammlung von PV-Modulen sind. Die Module sind ein Teil weiterer Systemkomponenten. Zu den Komponenten des PV-Systems gehören Ausrüstungen für die Spannungsaufbereitung und Energiespeicherung, die Montage und Unterstützung des PV-Feldes, die Messung der Systemleistung und die Sicherheitsgewährleistung (Peasall 2017, 1). Die Module erzeugen in einem ersten Schritt Gleichstrom. Um den Solarstrom im Gebäude nutzen zu können, muss der Gleichstrom über einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt werden. Das Ziel ist in erster Linie den Zukauf von Strom zu reduzieren. Wird mehr Strom erzeugt als im Gebäude benötigt wird, kann dieser ins Netz eingespeist und an ein Energieversorgungsunternehmen verkauft werden (Stadt Wien 2021, 14).

Die Leistungsfähigkeit der Anlage und die Betriebsbedingungen sind von zentraler Bedeutung für die Menge an erzeugter Energie. Der Wirkungsgrad hängt vom Standort der PV-Anlage ab und beinhaltet Parameter für die Sonneneinstrahlung und klimaabhängige Aspekte, welche die Systemleistung beeinflussen, und die die technische und wirtschaftliche Machbarkeit beinhaltet (Peasall 2017, 1). Weitere Aspekte von PV-Systemen sind Lebensdauer und Energievorhersage, die von einer Vielzahl von Parametern abhängt. Zentral für die Lebensdauerbewertung sind die klimatischen Bedingungen der Umgebung und die Systemauslegung. Die verwendete Technologie und die Degradation von Systemkomponenten geben Aussage darüber, wie viel Verlust an Leistung ein System mit der Zeit hat (Georgitsioti 2019, 738).

Polykristalline PV-Module brauchen unter den verfügbaren Solarmodulen eine mittlere Fläche, um ein Kilowattpeak an Solarstrom zu erzeugen. Um 1 kWp an Spitzenleistung zu erzeugen, benötigt man etwa 7-8 m² Fläche (Doormann 2022).

Das folgende Kapitel beschreibt PV-Anlagen und ihre Komponenten für eine nachhaltige Nutzung. Die Eigenschaften und deren Vor- und Nachteile werden bezüglich Leistung und Lebensdauer der PV-Felder dargestellt. Das liefert eine Übersicht über PV-Module und Systeme, die für Freiland- und gebäudeintegrierte Konstruktionen verwendet werden können.

2.4.1 Systemkategorien und Technologien

PV-Anlagen lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen. Es gibt netzgekoppelte Systeme, die darauf ausgelegt sind, jederzeit ihre maximale Energieleistung zu erbringen und dazu beitragen, Strom in elektrische Leitungen einzuspeisen. Die andere Kategorie sind die autarken PV-Anlagen. Diese Systeme arbeiten unabhängig von der Netzversorgung und befinden sich demnach dort, wo kein Stromnetz vorhanden oder das Netz schwer zugänglich ist. Im Jahr 2014 machten netzgekoppelte PV-Anlagen rund 99 % der gesamten weltweit installierten Leistung aus (Peasall 2017, 2). In dieser Arbeit werden nur die netzgekoppelten Anlagen näher betrachtet.

Auch die netzgekoppelten Systeme lassen sich in zwei Systeme einteilen. Hier gibt es das verteilte und das zentralisierte System, wobei die Klassifizierung mit verschiedenen Definitionsgrundlagen vorgenommen werden kann. Dabei kann nach Größe, Konfiguration oder Netzanschlusspunkt unterschieden werden. Im Allgemeinen speisen zentrale Systeme nur in das Netz ein, daher handelt es sich meist um Freiflächenkonstruktionen. Gebäudeintegrierte Systeme sind meist verteilte Systeme (Peasall 2017, 2). Eine andere Einteilung für PV-Anlage ist die Unterscheidung zwischen Flachplatten- und Konzentrator Systemen. In Konzentrator Systemen werden Linsen oder Spiegel verwendet, um die

Intensität des Sonnenlichts zu erhöhen (Peasall 2017, 3). Die vorrangig verwendeten PV-Systeme sind jedoch Flachpaneele und sie bestehen aus kristallinem Silizium.

Die Technologie der PV-Module enthält Parameter, um ihre wirtschaftliche Rentabilität zu gewährleisten. Die Module sollen eine hohe Leistungsfähigkeit, Stabilität im Betrieb, Herstellbarkeit und eine kostengünstige Herstellung aufweisen (Peasall 2017, 3). Ein Aspekt ist deren Nachhaltigkeit, wobei eine lange Lebensdauer (20- 30 Jahre) der PV-Paneele einen großen Beitrag leistet. Die unterschiedlichen Modulparameter führen zu Leistungsunterschieden der PV-Module. Ein Unterschied ist der Umwandlungswirkungsgrad, d.h. das Verhältnis zwischen der elektrischen Leistung des Moduls und der empfangenen Solarstrahlung. Andere Modulparameter, die einen Unterschied in der PV-Modulleistung machen, sind spektrale Reaktion, Temperatur, Strom und Leistung, Zellstabilität und Variationen im Moduldesign (Peasall 2017, 4).

Auch wenn alle Parameter für eine hohe Leistung erfüllt sind, müssen die Montage und Konstruktion sowie die Ausrichtung des PV-Moduls berücksichtigt werden, um den maximalen Energieertrag zu erzielen.

2.4.2 Mono- und polykristalline Solarzellen

Sowohl mono- als auch polykristalline Solarzellen bestehen aus Siliziumscheiben. Der Unterschied liegt jedoch in der Herstellungsweise. Monokristalline PV-Zellen bestehen aus einem zusammenhängenden Silizium-Kristall. Polykristalline Solarzellen bestehen aus mehreren Kristallen in verschiedenen Größen. Außerdem wird für Monozellen reineres Silizium verwendet als für polykristalline Zellen. Im Vergleich sind monokristalline Solarzellen teurer als polykristalline, jedoch um 20 bis 30 % leistungsfähiger und daher vor allem für kleine Dächer geeignet. Um ein kWp mit monokristallinen Solarzellen zu erzeugen werden ca. 6- 9 Quadratmeter benötigt. Im Vergleich dazu braucht man bei polykristallinen Solarmodulen für ein kWp ca. 7-10 Quadratmeter (Doormann 2022).

Die Treibhausgasbilanz der Module hängt stark von dem verwendeten Energiemix ab, daher macht es einen Unterschied, wo die Zellen produziert werden. Zum Beispiel wird in Polen der Großteil der Energie für die Erzeugung aus fossiler Verbrennung generiert, hingegen in Norwegen stammt die elektrische Energie aus Wasserkraft (Fritz 2012, 44).

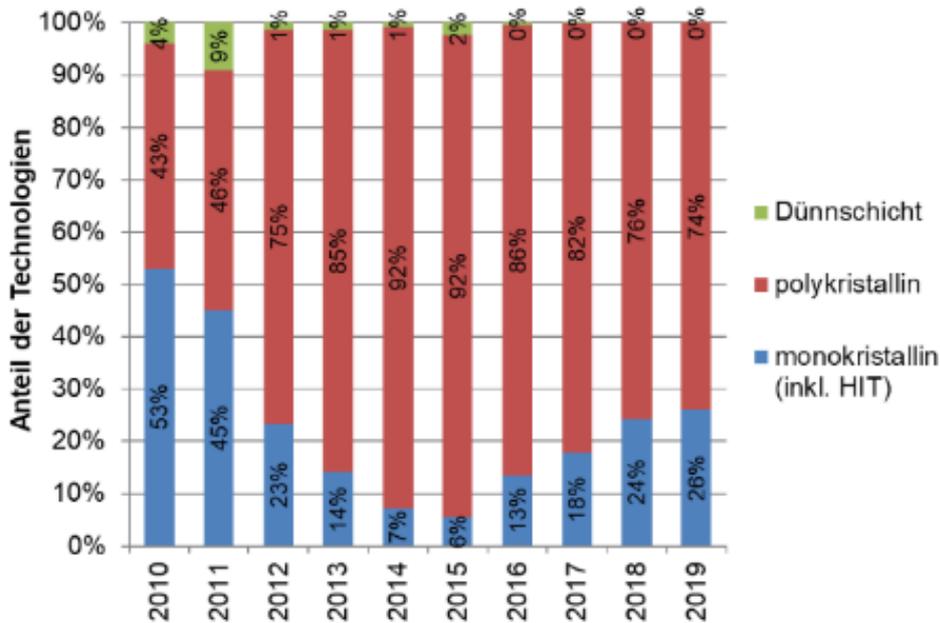


Abbildung 3: Installierte Solarzellentypen in Österreich 2010 bis 2019 (Quelle: Biermayr et. al. 2019, 209)

In der folgenden Abbildung werden die Anteile der unterschiedlich installierten Solarzellentypen von 2010 bis 2019 in Österreich dargestellt.

Am häufigsten werden mono- und polykristalline Silizium-Solarzellentypen installiert. Dünnschichtzellen hatten im Jahr 2011 ein Hoch, spielen aber im Jahr 2019 eine vergleichsweise unbedeutende Rolle (Biermayr et. al. 2019, 109).

Eine weitere Anwendung der monokristallinen Zellen sind bifaziale Module. Bei diesen Modulen sind die Solarzellen sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite photovoltaisch aktiv. Durch die Aktivität beider Seiten wird der Ertrag der Solarzelle von 5% bis 30% zu herkömmlichen monofazialen Modulen gleicher Größe erhöht. Wie hoch der Mehrertrag genau ist, hängt stark von der Umgebung und der Installation der Anlage ab. So haben Neigungswinkel und Rückstrahlvermögen des Untergrunds Einfluss auf den Wirkungsgrad der Module. Die Herstellung der bifazialen Module ist aufwendiger als die der monofazialen Anlagen. Es sind zusätzliche Produktionsschritte notwendig. Die Rückseite der Zellen muss poliert und anschließend für die elektrischen Kontakte wieder bearbeitet werden. Die vollflächige Metallisierung mit Aluminium auf der Rückseite wird durch ein Gitter ersetzt, das dem der Solarzellen auf der Vorderseite ähnelt. Ausgeführt werden die bifazialen Module als rahmenlose, Glas-Glas- aber auch als Glas-Folie-Module. Die Rückseite des Moduls sollte möglichst transparent sein, um ein Eindringen des Sonnenlichts zu ermöglichen (Solarenergie 2021).

Ob bifaziale oder monofaziale Anlagen eingesetzt werden, hängt vom Installationsort ab. Bifaziale Anlagen sollten von beiden Seiten mit Licht beschienen werden können, sind also zum Beispiel für PV-Anlagen, die direkt auf Gebäuden angebracht werden, weniger geeignet.

2.4.3 Systembilanz einer Photovoltaikanlage (Balance of the system (BOS)-Ausrüstung)

Die BOS-Ausrüstung sind alle Komponenten des Systems außer dem PV-Generator selbst. Dies kann je nach Systemdetails Stromkonditionierung, Stromspeicherung, Verkabelung, Sicherungen und Schalter, Überwachungsgeräte und andere Teile umfassen. Außerdem sollte die BOS-Ausrüstung so effizient wie möglich gestaltet werden. Beispielsweise können Querschnitte und Kabellänge so gewählt werden, dass der Energieverlust gering ist. Um effiziente Komponenten zu konstruieren, sollten die Lebensdauer des BOS und das Verhältnis von Energieausgang zu Energieeingang berücksichtigt werden (Peasall 2017, 5f.).

2.4.4 Betriebsbedingungen und Leitungen von PV-Anlagen

Ein weiterer Parameter für eine hohe Leistung der PV-Anlage ist die Gleichmäßigkeit der angeschlossenen PV-Module. Alle elektrisch angeschlossenen Module sollten in Typ und Montagesystem sowie in ihrer Ausrichtung einheitlich sein. In diesem Zusammenhang stellt der Schattenwurf ein Problem dar, da ein Teil des Systems beschattet werden kann, während der andere noch von der Sonne beschienen wird und die Leistung der PV-Anlage abfällt (Peasall 2017, 8f.). Deshalb sollte große Sorgfalt auf das Design der Anlage gelegt werden, um eine gleichmäßige Sonneneinstrahlung auf alle Paneele zu gewährleisten.

Auch die Betriebsbedingungen sind im Hinblick auf die elektrische Leistung der PV-Anlage zu diskutieren, insbesondere die Sonneneinstrahlung und die Betriebstemperatur sowie das Sonnenspektrum. Zu beachten ist, dass sich die Betriebsbedingungen im Tagesverlauf aufgrund von Änderungen des Sonnenstands, der Temperatur und der Wetterbedingungen ändern können. Dies ist zu berücksichtigen, weil die Leistung mit steigender Temperatur abnimmt (Peasall 2017, 9ff.). Deshalb muss das Montagesystem der PV-Anlage in die Gestaltung mit einbezogen werden.

Generell haben PV-Systeme eine Lebensdauer von 20-30 Jahren basierend auf PV-Modulleistungsgarantien, die eine Leistungsreduzierung von weniger als 20 % über einen Zeitraum von beispielsweise 20 Jahren vorsehen (Peasall 2017, 20).

2.5 Freiflächen PV-Anlagentypen

Bei Freiflächenanlagen ist zwischen nachgeführten und starren Anlagen zu unterscheiden. Nachgeführte PV-Anlagen folgen dem Stand der Sonne. Für die Herstellung der Nachführsysteme wird im Vergleich zur Produktion des Restes der Anlage viel Energie benötigt. Dafür werden in der Regel große Mengen an Stahl benötigt, was zu einer im Vergleich zu anderen Anlagentypen höheren Ökobilanz führt (Fritz 2012, 51). Daher werden nachgeführte Anlagen in dieser Diplomarbeit nicht bearbeitet.

PV-Freiflächenanlagen können vielseitig eingesetzt werden. Sie sind wesentlich flexibler als gebäudeintegrierte PV-Anlagen, da nicht auf die Ausrichtung des Gebäudes geachtet werden muss. Damit bieten die PV-Freiflächenanlagen zahlreiche Mehrfachnutzungen; durch Beschattung und Wassermanagement kann ein erhöhter Ertrag für die Bodenfläche entstehen. Neben der Nutzung bei Agri-PV- Flächen können auch Flächen wie Parkplätze und öffentliche Plätze und viele mehr durch die Mehrfachnutzung aufgewertet werden (Stadt Wien 2021, 30).

Vor allem bei Agrarflächen ist auf die Mehrfachnutzung und die Nachhaltigkeit der Anlage zu achten. Priorität hat die Gewährleistung von Standsicherheit und Sicherheitsanforderungen. Zusätzlich ist die Erhaltung landwirtschaftlicher Böden zentral. Deshalb wird von permanenten Betonfundamenten abgeraten. Als Alternative werden Raumbündel oder spezielle Verankerungen mit Spinnankern eingesetzt. Dies ermöglicht einen rückstandslosen Abbau der Anlage (Trommsdorff et al. 2020, 31).

Bei der Installation von PV-Freiflächenanlagen ist auf das Ausmaß zu achten. Generell existieren keine einheitlichen Parameter. Im Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz werden große Anlagen mit einer installierten Leistung ab 250 kWp beziffert. Demnach wird nicht nach Flächengröße, Modulgröße oder Ertrag, sondern nach installierter Leistung klassifiziert (Koscher 2021,52).

2.6 Gebäudegebundene PV-Anlagen

Wohn- und Geschäftsgebäude tragen in etwa 51% zum weltweiten Energieverbrauch bei, mehr als der Industrie- und auch der Verkehrssektor. Folglich ist die Reduzierung ihres Energiebedarfs durch Effizienzsteigerung und On-Site Energieproduktion ein entscheidender Bestandteil einer nachhaltigen Strategie. Bauwerkintegrierte Photovoltaik (GIPV)-Anlagen bearbeiten den wachsenden Bedarf an Energieeffizienzsteigerung von Gebäuden. Eine genaue Berechnung der möglichen Leistung einer PV-Anlage hat Auswirkungen auf die Verteilung der Energieressourcen und das Verhalten der Konsumenten, da die Kosten vorhersehbarer werden. (Turki 2021, 19f)

Die Integration in Gebäude bezieht sich auf die Kombination von Funktion und Struktur, während die architektonische Integration das Kriterium der Ästhetik hinzufügt. Der Begriff GIPV kann sich auch auf Systeme beziehen, die herkömmliche Baustoffe vollständig ersetzen und daher alle ihre Funktionen innerhalb eines Gebäudes erfüllen müssen. Der Energieverbrauch kann durch die Integration von PV-Anlagen in ein Gebäude effektiv reduziert werden und der Vorteil gegenüber nicht-integrierten Systemen liegt vor allem in den geringeren Gesamtkosten für die erforderlichen Baumaterialien. Ein GIPV-System wird von verschiedenen Faktoren innerhalb eines Gebäudes beeinflusst. Dazu zählen die Temperatur der Module selbst, Schatten und der Winkel der Installation. Die Temperatur kann beispielsweise durch eine strömende Luft zwischen den doppelwandigen Glaswänden reduziert werden. (Eko et al. 2015, 1f)

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Effizienz von GIPV ist die tatsächliche Aufnahme von Solarstrahlung. Der Schattenwurf von Gebäudeelementen reduziert dieses Potential, der jedoch durch eine faltbare Konstruktion der PV-Anlage reduziert werden kann. Abhängig von der Nähe zum Äquator kann eine Errichtung auf dem Dach effektiver sein, da die Sonneneinstrahlung auf der oberen Seite des Gebäudes dominiert. Obwohl die technische Differenzierung der verschiedenen Integrationsmöglichkeiten in ein Gebäude deutlich ist, unterscheiden sich die sozioökonomischen Treiber und Hindernisse für ihre Integration. Unterschiedliche Integrationsebenen implizieren unterschiedliche Ebenen der Störung in Bezug auf etablierte Praktiken im Bausektor, was zu unterschiedlichen Möglichkeiten für eine Bereitstellung von PV-Anlagen führt. (Susan 2016, 110)

In diesem Rahmen kann eine Typologie von GIPV-Anwendungen entsprechend ihrer Position innerhalb des Gebäudes definiert werden: Systeme auf Dächern, Fassaden und Außenstrukturen. Dächer sind aufgrund ihrer geeigneten Lage in Bezug auf die Solarressource die naheliegende Lösung für PV-Installationen in Gebäuden. Schrägdächer bieten eine ideale Plattform für PV-Anlagen, die für eine optimale Leistung eine geneigte Position benötigen. Die Montage von PV-Anlagen auf Dächern bestehen aus einem System, das die Module gegen witterungsbedingte Belastungen aufrechterhält. Die Produktion von ästhetisch ansprechenderen Montage-Systemen fällt in die Kategorie der konstruktiven Ergänzung eines Gebäudes. Diese Systeme umfassen entweder Montageteile und Laminate, die einen Teil des Dachmaterials ersetzen, oder vorgefertigte PV-Ziegel, Schindeln und Schieferplatten, die zu gängigen Bauelementen passen. Diese Systeme sind im Allgemeinen teurer und müssen mehrere Wetterschutzanforderungen erfüllen. (Susan 2016, 111)

Flachdächer sind bei Gewerbe- und Industriegebäuden üblich und bieten ein hohes Potential für eine breitflächige Installation von PV-Anlagen. Module können potenziell in jede Richtung positioniert werden, wodurch ihre Energieausbeute maximiert wird. Je nach Art des

Dachmaterials können diese Regalsysteme mit dem Dach verschraubt oder mit Ballast beladen werden. Moderne PV-Technologien ermöglichen die Herstellung von flexiblen Laminaten, die mit Klebstoffen direkt auf dem Dach befestigt werden können. Diese leichten Edelstahlfolien oder Kunststoffmembranen lassen sich einfach montieren und bieten eine nahtlose Integration an. Flach- oder Welldächer mit geringer Tragfähigkeit sind jedoch oft anfälliger für Witterungseinflüsse. Glasdächer einschließlich Oberlichtern und Atrien sind Beispiele für potenzielle Träger von vollständig integrierten PV-Systemen, die alle strukturellen, schall- und wetterschützenden Funktionen herkömmlicher Glasmaterialien erfüllen. (Groenewolt et al. 2016, 261ff)

Eine frühzeitige Berücksichtigung der GIPV-Systeme während der Bauphase ist unerlässlich, zusammen mit der aktiven Beteiligung sowohl des Architekten als auch des Ingenieurteams, was ein hohes Maß an Kommunikation und Zusammenarbeit erfordert. BIPV-Module können in Gebäudefassaden installiert werden, indem ein äußeres Verkleidungselement hinzugefügt, eine äußere Schicht ersetzt oder das gesamte Fassadensystem ersetzt wird. Vorhangfassadensysteme und Verglasungen bieten zusätzliche Möglichkeiten für die PV-Integration von lichtundurchlässigen oder halbtransparenten Modulen. Bei der Planung einer GIPV-Anlage muss ein Kompromiss zwischen Energieertragsoptimierung und ästhetischer Integration gefunden werden. Obwohl die Stromerzeugung nicht die einzige Funktion von GIPV-Anwendungen ist, ist sie ein wesentlicher Faktor, der die GIPV-Designentscheidungen sowohl für Produktentwickler als auch für Benutzer beeinflusst. Verbrauch und Handel des erzeugten Stroms bieten finanzielle Renditen, die den höheren Preis von GIPV-Systemen im Vergleich zu herkömmlichen Baumaterialien kompensieren. Daher führt die Maximierung der Leistungsabgabe zu höheren Renditen und kürzeren Amortisationszeiten der Anfangsinvestition. Darüber hinaus bestimmt die Gesamtstrommenge, die von einem BIPV-System erzeugt wird, in hohem Maße die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. (Wu 2022, 2)

Die folgende Abbildung zeigt anteilig die PV-Montagearten, welche im Jahr 2019 in Österreich neu installiert wurden:

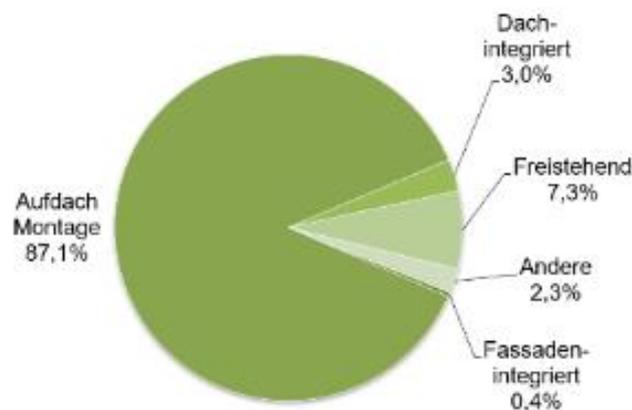


Abbildung 4: Montageart der in Österreich installierten Photovoltaikanlagen 2019 bezogen auf die im Jahr 2019 neu installierte PV-Leistung n=26, (Quelle: Erhebung Technikum Wien, Biermayr et. al. 2019, 110)

Deutlich ist, dass den größten Anteil eindeutig die Aufdachanlagen bilden, da die in die Bausubstanz integrierten PV-Anlagen meist nur bei Neubau eingesetzt werden. Dennoch stieg der Anteil von dachintegrierten Anlagen seit 2018 um 2,99% (Biermayr 2020, 110).

2.7 Kosten von PV-Anlagen

Die Kosten für PV-Anlagen sind von 2011 bis 2021 vor allem in Bezug auf die Anschaffungskosten um ungefähr 50 % gesunken. Außerdem sind spezifische Kosten bei größeren Anlagen geringer als bei kleinen. Im Gegensatz dazu ist die Amortisation der Kosten von PV-Anlagen rascher möglich, wenn der Strom der Anlage selbst genutzt wird, da der Zukauf von Energieversorgungsunternehmen reduziert wird und dadurch auch weniger Netzausgaben und Steuern zu zahlen sind (Stadt Wien 2021, 34).

Die Kostenfindung des PV-Stroms wird zu einem großen Teil mit den Investitionskosten für die Materialien und den Bau der PV-Anlage berechnet (Frühwald 2008,30). Vor allem der Stahlpreis unterliegt seit 2022 hohen Schwankungen, deshalb ist es schwierig eine genaue Schätzung für die Konstruktionen der PV-Anlagen abzugeben (Stahlpreise 2022).

Die Kosten für Photovoltaikmodule werden in €/kWp gerechnet. Die Kosten sind einerseits abhängig vom Zelltyp und andererseits vom Herstellungsland. Die Betriebskosten sind als gering anzusehen. Sie betragen meist nur ein Prozent der Gesamtinvestition. Die Betriebskosten beinhalten Wartungs- und Servicearbeiten. Diese sind aber Großteiles auf

Reinigungs- und Schneeräumungsarbeiten beschränkt. Zu den Betriebskosten zählen auch die Dachmiete bzw. Flächenpacht bei Freiflächenanlagen (Frühwald 2008, 32).

Die Anlagen selbst sind bei großflächigen PV-Anlagen meist generell günstiger als kleine Anlagen. Allerdings fallen bei großflächigen PV-Freiflächenanlagen auch die Nebenkosten (Umzäunung, Netzanschluss, Leitungsverlegung, ...) ins Gewicht. International wird im aktuellen IEA PVPS Trends Report über typische Installationskosten von 600USD (540€) pro kWp für PV-Großanlagen berichtet (Fechner 2020, 50).

In der Fechner- Studie im Auftrag von Österreich Energie werden in Zusammenhang mit der PV-Marktstatistik für Österreich (Biermayr et. al. 2019) Preisschätzungen für PV-Anlagekategorien ermittelt. Die Anlagegröße wird in kWp und der Preis in Euro angegeben.

| Anlagengröße | Minimum | Mittelwert | Maximum |
|--------------------------|---------|------------|---------|
| 1kWp Anlagen | 1500 | 2127 | 3000 |
| 5kWp Anlagen (Aufdach) | 1170 | 1567 | 2000 |
| 10...100kWp Anlagen | 800 | 1267 | 1650 |
| 10...100kWp BIPV Anlagen | 1500 | >2000 | k.A. |
| 100...250 kWp | 800 | 1000 | 1100 |

Abbildung 5: Kosten für PV-Anlagen in Euro je Flächenkategorie (Quelle: Fechner 2020, 50)

Die „Innovative Energietechnologie in Österreich“ verfolgt die Preisänderungen der PV-Anlagen und die Ergebnisse werden pro kWp angegeben und exklusive Mehrwertsteuer berechnet (Biermayr et. al. 2019, 112).

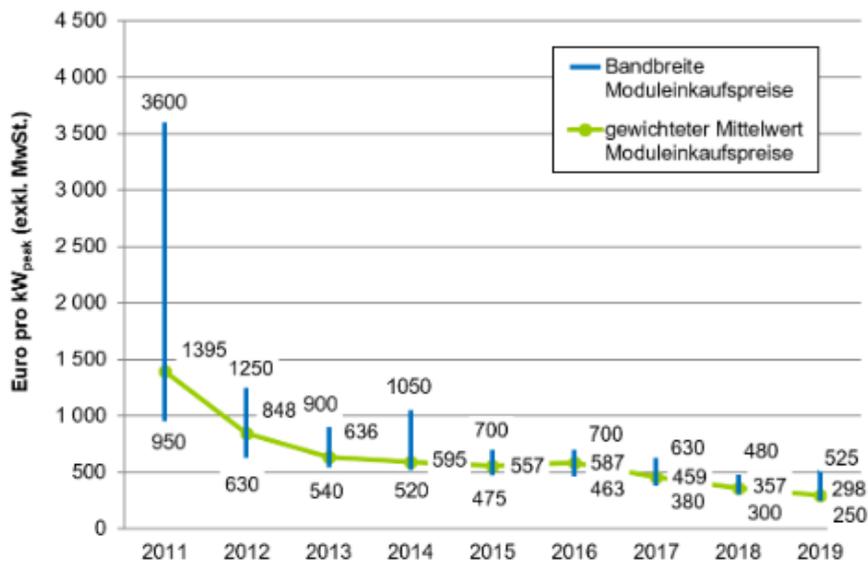


Abbildung 6: Moduleinkaufspreise von Anlagenerrichtern und Planern 2011 bis 2019 Mittelwert und Badbreite (Quelle Biermayr et. al. 2019, 112)

Die Statistik in Abbildung 11 zeigt wie stark der Preis pro PV-Anlagen in den letzten Jahren durch den Fortschritt in Produktion und Forschung gefallen ist. Dennoch ist der Preis für die Aufbauten durch die Preisschwankungen des Materials der Aufbauten nur in einem konkreten Zeitraum genau berechenbar.

3 Methodik

Das Kapitel der Methodik, um die ökologischen Auswirkungen von Dach- und Freiflächen-PV zu evaluieren, besteht aus zwei Teilen. Einerseits aus einer Lebenszyklusanalyse und der Berechnung der Energy Payback Time der Aufbauten der PV-Anlagentypen und andererseits aus einer GIS- Analyse, die das Ausbaupotential in Zusammenhang mit dem Bedarf an elektrischen Strom zweier beispielhaften Gemeinden in der Steiermark berechnet. Das Vorgehen wird in Abbildung 8 dargestellt:

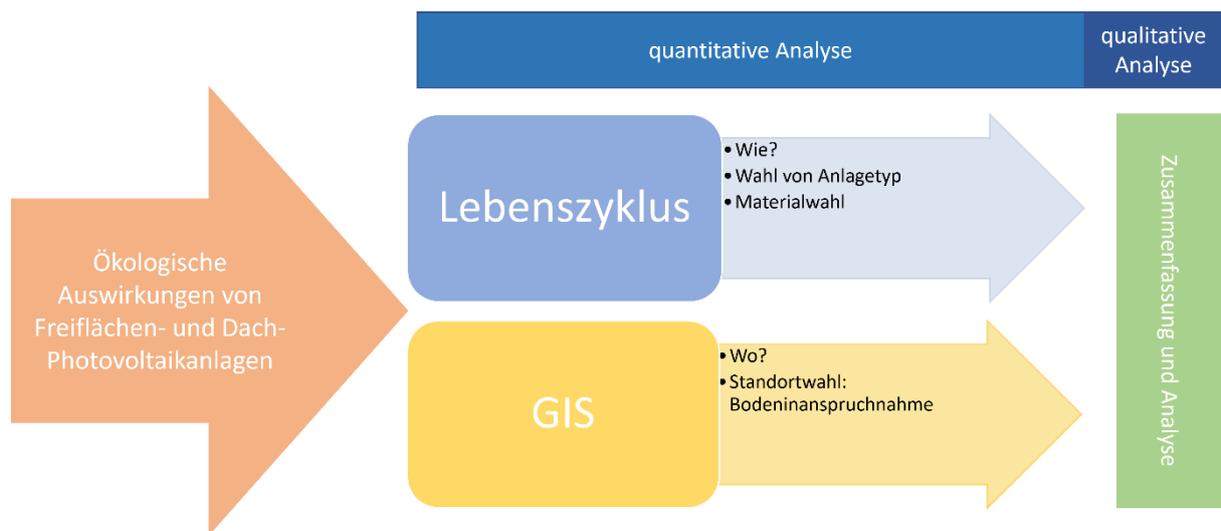


Abbildung 7: Überblick über die Methodik der Masterarbeit (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)

Im Abschnitt der Lebenszyklusanalyse werden Materialien und Anlagentypen für den Vergleich bestimmt und deren Global Warming Potential (GWP) berechnet. Die genauen Schritte der Lebenszyklusanalyse werden in Abbildung 9 dargestellt. Zuerst wird das Ergebnis rein quantitativ analysiert und anschließend qualitativ verglichen. Im Vordergrund liegt der Unterschied zwischen Freiflächen- und Gebäude-PV. Auch bei der Analyse des Energy Payback Time (EPBT) wird zuerst quantitativ und im Anschluss qualitativ bewertet.

Die beiden Analysemethoden werden zusätzlich in Vergleich zueinander gestellt und die Ergebnisse werden zusammen analysiert.

Lebenszyklusanalyse Arbeitsschritte

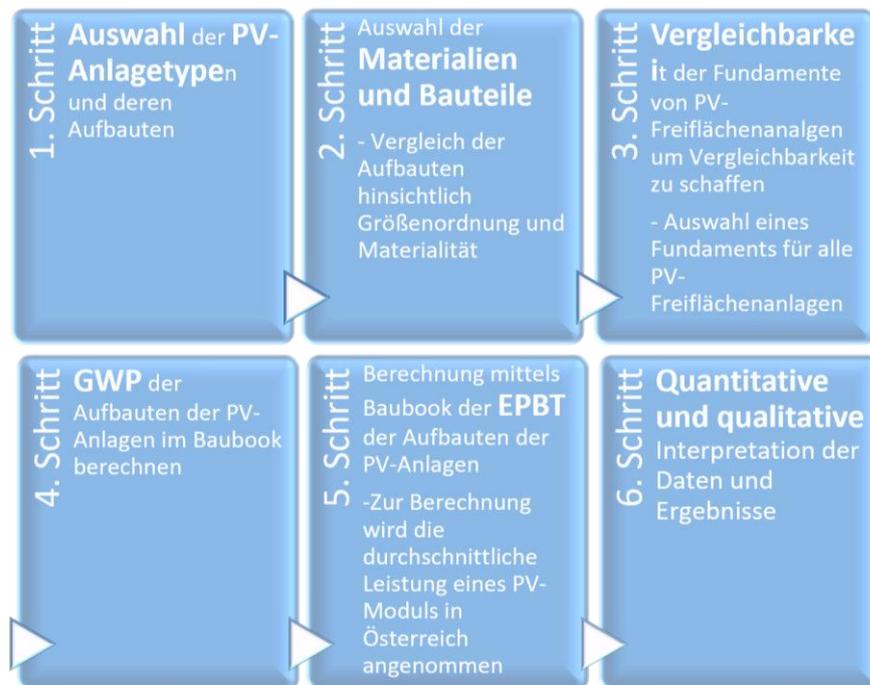


Abbildung 8: Arbeitsschritte der Lebenszyklusanalyse (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)

Die GIS-Analyse setzt die Daten der Lebenszyklusanalyse beispielgebend in einen räumlichen Kontext um. Es werden zwei Gemeinden als Beispiel ausgewählt, welche einerseits räumliche Unterschiede aufweisen, aber repräsentativ für Österreich sind und andererseits ist auch die Verfügbarkeit der Daten ein Kriterium für die Auswahl. Für die Analyse wurden die zwei Gemeinden Weiz und Thannhausen in der Steiermark ausgewählt. Weiz ist eine stark bebaute städtische Gemeinde und Thannhausen ländlich. Als erster Schritt wird der elektrische Strombedarf der Gemeinden Weiz und Thannhausen mit Hilfe des Energiemosaiks und der Nutzenergieanalyse der Steiermark berechnet. Mit den GIS-Daten der Steiermark können die PV-Ausbaupotentiale der beiden Gemeinden berechnet werden. Mit den Ergebnissen dieser beiden Berechnungen kann anschließend eine Einschätzung abgegeben werden, wie viel des Energiebedarfes in Weiz und Thannhausen von Dach-PV abgedeckt werden kann und wie viele PV-Anlagen in der Freifläche aufgestellt werden müssten. So kann ein quantitativer Vergleich der beiden Gemeinden auf Ebene des technischen Potentials abgegeben werden. Die Herangehensweise wird in Abbildung 10 genauer beschrieben und dargestellt.

GIS-Analyse Arbeitsschritte



Abbildung 9: Arbeitsschritte der GIS-Analyse (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)

Die Methodik demonstriert die ökologischen Auswirkungen von Dach- und Freiflächen-PV. Die GIS-Analyse ist ein Beispiel der Anwendung in zwei Gemeinden, die sehr unterschiedliche räumliche Voraussetzungen haben und somit beispielhaft für andere Gemeinden stehen können. Die Lebenszyklusanalyse zeigt in dem Zusammenhang den ökologischen Aspekt der Aufbauten von PV-Anlagen, welche und wie viele in dem räumlichen Beispiel umgesetzt werden können.

3.1 Lebenszyklus- Analyse und CO₂ Potential von PV-Konstruktionen

PV-Anlagen sind Stromerzeugungsquellen, die sehr vielversprechend für die Einsparung von Ressourcen und die Reduktion von CO₂-Emissionen sind. Die Forschung arbeitet dahingehend, dass recycelte Materialien eingesetzt und die Designs effektiver werden (Sherwani 2010, 544).

Für eine nachhaltige Entwicklung werden Methoden und Instrumente herangezogen, welche den Umwelteinfluss des Menschen messen und vergleichen. Mit einer steigenden Nachfrage nach Elektrizität steigen auch die Probleme und die Wichtigkeit einer nachhaltigen Gewinnung von Energie. Die Lebenszyklusanalyse ist eine Methode zur Bewertung verschiedener Aspekte in der Entwicklung eines Produkts und seiner potentiellen Auswirkungen während der gesamten Lebensdauer (Sherwani 2010, 540). Dies bedeutet eine Bewertung der

Auswirkungen auf die Umwelt, angefangen bei der Materialbeschaffung und-bearbeitung, der Herstellung und Nutzung der Anlagen bis hin zur Entsorgung des Produkts. Die Methodik und der Umfang sowie die Qualität der Daten soll transparent dargestellt werden, da die Ergebnisse sich je nach Ziel der Analyse unterscheiden (Varun 2009,1067).

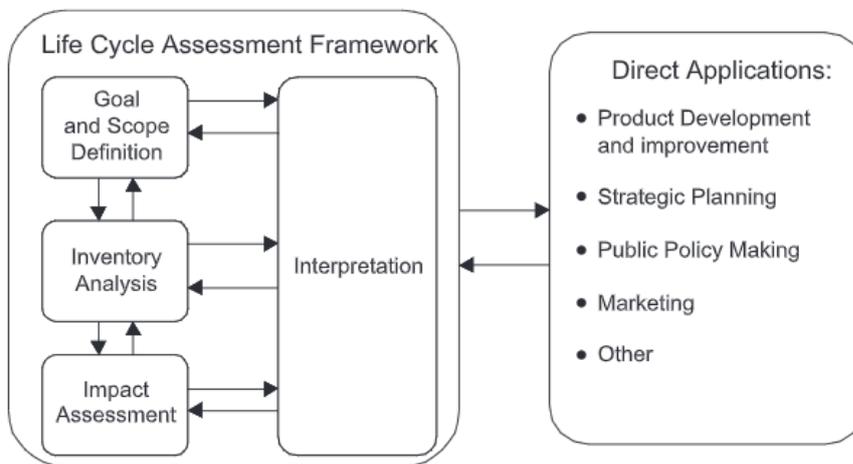


Abbildung 10: Phasen und Applikationen einer Lebenszyklusanalyse (Quelle: Rebitzer 2004, 704)

Der erste Schritt der Lebenszyklusanalyse definiert Ziel und Umfang der Recherche und legt die relevante Fragestellung und Zielsetzung fest. Außerdem werden das System und seine Grenzen sowie die Einheiten festgelegt. Die Schadstoff-, Stoff-, Ressourcenströme werden in der Bestandsanalyse erfasst. Diese elementaren Ströme (Emissionen, Ressourcenverbrauch etc.) werden für verschiedene Umwelteinflüsse in der Wirkungsabschätzung charakterisiert, zusammengefasst und abschließend in der Interpretationsphase verglichen und eine Schlussfolgerung aus den Daten herausgearbeitet.

Lebenszyklusanalysen sind Vergleiche verschiedener Produkte und Systeme oder verschiedener Materialherstellungs- oder Recyclingverfahren. Die Ökobilanz kann als Instrument zur Erkennung von Verbesserungspotentialen mit dem Ziel verwendet werden, die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt und die Ressourcenverknappung zu verringern (Sherwani 2010, 541).

3.1.1 Grundlagen für die ökologische Bewertung von Baustoffen

Die ökologische Bewertung von Baustoffen ist eine rein quantitative Methode und erfolgt in dieser Arbeit mit der Software „Baubook- Ökobilanz für Gebäude“. Zur quantitativen Bewertung von Baustoffen wird ein vereinfachtes Umweltmodell herangezogen, indem Stoff-

und Energieflüsse analysiert werden. Jedem In- und Output der Rohstoffe werden mess- und quantifizierbare Daten zugeschrieben (IBO 2010, 6f.).

Als Ergebnis der ökologischen Bilanz von Baustoffen wird unter anderem die „globale Erwärmung durch Treibhausgase“ (Global Warming Potential, GWP) angegeben. Das GWP wird über das mengenmäßig wichtigste Treibhausgas Kohlendioxid angegeben. „Dieses Treibhauspotential beschreibt den Beitrag einer Substanz zum Treibhauseffekt relativ zum Beitrag einer gleichen Menge Kohlendioxid. Für jede treibhauswirksame Substanz wird damit eine Äquivalenzmenge Kohlendioxid in Kilogramm errechnet. Somit kann der direkte Einfluss auf den Treibhauseffekt zu einer einzigen Wirkungskennzahl zusammengefasst werden, [...]“ (IBO 2010, 9) Das Treibhausgaspotential kann zusätzlich für verschiedene Zeithorizonte angegeben werden (IBO 2010, 9). Für die Bauteile dieser Arbeit wird eine Zeitspanne von 30 Jahren angenommen, da auch die PV-Module in etwa 30 Jahre haltbar sind.

Zur Berechnung der Aufbauten der PV-Anlagen werden die einzelnen Bauteile in das Baubook eingegeben. So können auch die gleichen Bauteile bei verschiedenen Aufbauten eingesetzt werden und es wird eine Vergleichbarkeit der Anlagentypen ermöglicht.

3.1.1.1 Verwendete Baustoffe und deren GWP (Global Warming Potential)

Für die Errichtung von Aufständern von PV-Anlagen können verschiedenste Baustoffe verwendet werden. In dieser Arbeit ist eine Auswahl getroffen worden, um die Bauteile vergleichen zu können. Es werden PV-Anlagentypen gewählt welche häufig in Österreich auf dem Dach oder in der Freifläche eingesetzt werden. Anlagen ohne Aufbauten, wie PV-Anlagen, welche in Gebäude integriert sind, und somit anderen Teile ersetzen, werden nicht berechnet.

Zur Berechnung ist das GWP-total (Globales Erwärmungspotential-total) herangezogen worden. Dies bedeutet, dass mit der Summe aus GWP-fossil und GWP-biogen gerechnet wird. Angegeben wird das Globale Erwärmungspotential in einem Zeitraum von 100 Jahren (GWP100) und in kg- CO₂- Äquivalent (kg CO₂- Äq.). Die Bezugsfläche des Ökoindex (BZF₀₁) ist eine konditionierte Bruttogrundfläche zusammen mit 50% der Bruttogrundfläche der Pufferräume (baubook o.j.).

| Material | GWP <i>kg CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁</i> |
|--|--|
| <i>Normalbeton mit Bewehrung 2 % (2400 kg/m³)</i> | 0,161 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Stahl verzinkt</i> | 2,12 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

| | |
|---|---|
| <i>Normalbeton C12/15 ohne Bewehrung (2400 kg/m³)</i> | 0,0866 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Nutzholz (525 kg/m³ - zB Lärche) - rauh, luftgetrocknet</i> | -1,69 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Aluminiumblech</i> | 5,97 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Gusseisen</i> | 1,47 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Unterlage Gummi, Kunststoff</i> | 2,59 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <i>Schaumgummi (60 kg/m³)</i> | 2,86 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

Tabelle 1: Materialliste mit deren GWP in kg CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁ (Quelle: baubook o.j.)

Die Tabelle zeigt die unterschiedlichen GWP-Werte der verwendeten Materialien. Auch wenn manche Materialien einen hohen GWP-Wert haben, bedeutet dies nicht, dass es einen großen Einfluss auf das Gesamtprodukt hat. Da zum Beispiel Gummi und Kunststoff im Fall von PV-Anlagen meist nur einen kleinen Anteil an dem Gesamtgerüst haben. Demnach fällt es bei der Berechnung trotz des hohen GWP-Wertes nicht oder nur geringfügig ins Gewicht.

Das negative GWP des Nutzholzes entsteht durch den negativen Wert des GWP- biogenic. Dieser Indikator berücksichtigt die während des Wachstums von Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene und über die Lebensdauer des Materials gebundene Menge an CO₂ sowie biogene Emissionen in die Luft durch Oxidation oder Zerfall von Biomasse. Da Holz CO₂ während des Wachstums aufnimmt, entsteht in der Ökobilanz ein negativer Wert (baubook o.j.).

Die positiven und negativen Werte werden in einer rein quantitativen Berechnung der einzelnen Materialien in der Lebenszyklusanalyse als Bauteile zusammengefasst und für die Aufbauten der PV-Anlagen berechnet um diese anschließend vergleichen zu können.

3.1.2 Ziel und Umfang der Lebenszyklusanalyse

Das Ziel der Lebenszyklusanalyse ist es, die Materialien der Aufständungen und Aufbauten von PV-Anlagen hinsichtlich ihrer Ökobilanz zu vergleichen. Für die PV-Module wird für alle Typen von PV-Aufbauten derselbe Wert für die Lebenszyklusanalyse angenommen und daher nicht extra angeführt. Untersucht wird der Unterschied der baulichen Vorrichtungen, um die PV-Module in der Freifläche oder auf Gebäuden anzubringen.

3.1.3 Bestandteile der Aufbauten von PV-Anlagen am Dach und in der Freifläche

Die Aufbauten von PV-Anlagen sind vor allem in der Freifläche von Anlage zu Anlage unterschiedlich. In der verwendeten Methode werden die Anlagentypen miteinander verglichen und die Materialien und deren Menge von Anlage zu Anlage in Bezug zueinander gestellt. Die Ergebnisse der Anlagentypen sind nicht universell einsetzbar, aber innerhalb der Methodik dieser Arbeit können sie miteinander verglichen werden.

3.1.3.1 Fundamente

Fundamente für PV-Module werden meist nur für Freiflächenanlagen benötigt. Für die Gründung von PV-Anlagen kommen verschiedene Techniken in Frage:

- Betonfuß:



Abbildung 11: Betonfuß (Quelle: pv-mounting o.j.)

Der Betonfuß wird meist als Beschwerung für PV-Dachkonstruktionen eingesetzt. In den meisten Fällen ist dies jedoch nicht nötig, da die Konstruktion direkt auf dem Dach angebracht ist. Es können auch PV-Freiflächenanlagen mit dieser Variante beschwert werden.

- Rammprofil:



Abbildung 12: Rammprofil (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11)

Die Gründung von Rammpfählen ist im Regelfall das einfachste und preisgünstigste Verfahren. Diese Verankerung kommt vor allem bei „starrten Anlagen mit Südausrichtung mit zwei Masten“, auch als „Modultische“ bezeichnet, zum Einsatz (MKULNV NRW 2014, 10).

- Schraubanker



Abbildung 13: Schraubanker (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11)

Schraubanker können vor allem bei weichen Böden eingesetzt werden. Ihr Vorteil ist, dass sie durch ihre Wendeln auch bei einer kürzeren Länge die gleiche Tragwirkung wie ein längerer Rammpfahl haben (MKULNV NRW 2014, 10).

- Punktfundament

Dieses Fundament wird in der Freifläche für die Verankerung von Bauwerken eingesetzt. Es unterscheidet sich jedoch in seiner Größe, je nach Größe des Bauwerks.

- Streifenfundament



Abbildung 14: Streifenfundament (Quelle: MKULNV NRW 2014, 11)

Ein Streifenfundament bildet einen stabilen und robusten Untergrund für Bauwerke. Es besteht aus massiv gegossenen, bewehrten Betonstreifen (Hess 2019) .

- Spinnenanker – Betonlose Fundamenttechnik



Abbildung 15: Spinnanker (Quelle: WOLF System GmbH 2022)

Spinnanker sind vielseitig einsetzbar, da sie in Form und Größe variabel sind. Sie können zwischen 6 und 12 Gewindestangen haben und diese können zwischen 2m und 6m lang sein. Vorteil eines Spinnankers ist, dass er ohne schwere Gerätschaften installiert und auch entfernt werden kann (Spinnanker GmbH 2022).

In der folgenden Tabelle werden die ungefähren Größenordnungen und die Bauteile der Fundamente beschrieben. Zusätzlich werden die Einsatzbereiche der beschriebenen Fundamente angeführt und ihre GWPs angegeben um diese vergleichen zu können.

| Fundament | Bauteile und Maße | Einsatzbereich | GWP (Global warming potential) - total (kg CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁) |
|-----------------------------|--|--|---|
| <u>Betonfuß</u> | - Normalbeton mit Bewehrung - 200x60x25cm | PV-Dachanlage oder Freifläche: <ul style="list-style-type: none"> Winkerverstellbares Basismodul | 7 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Rammprofil</u> | - verzinkter Stahl - U-Träger 5x5cm - Stärke: 0,4cm - Länge: 80cm | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> Module mit Ost- West-Ausrichtung Modultisch mit starrer Südausrichtung | 32 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Schraubenanker</u> | - verzinkter Stahl - Durchmesser: 15cm - Stärke: 0,7 cm - Länge: 80cm | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> Module mit Ost- West-Ausrichtung Modultisch mit starrer Südausrichtung | 166 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Punktfundament klein</u> | - Normalbeton mit Bewehrung - 30x30x80 | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> Module mit Ost- West-Ausrichtung Modultisch mit starrer Südausrichtung | 122 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Punktfundament groß</u> | - Normalbeton mit Bewehrung - 40x40x80 | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> Masthalterung Senkrechte PV-Anlagen | 199 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

| | | | |
|--------------------------|---|--|--|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Starre Südausrichtung mit einem Mast • Parkplatzüberdachung • PV- Module auf zweiter Ebene | |
| <u>Streifenfundament</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Normalbeton mit Bewehrung - 200x60x25cm | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> • Module mit Ost- West- Ausrichtung • Modultisch mit starrer Südausrichtung | 466 kg CO2 equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Spinnanker klein</u> | <ul style="list-style-type: none"> - 6 Stück Stahlzylinder (Durchmesser; 0,6cm und Länge: 200cm) - Gusseisenplatte 12x12x3cm | PV-Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> • Modle mit Ost- West- Ausrichtung • Senkrechte PV- Anlage • Starre Südausrichtung mit einem Mast • Parkplatzüberdachung | 47 kg CO2 equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Spinnanker groß</u> | <ul style="list-style-type: none"> - 12 Stück Stahlzylinder (Durchmesser; 0,6cm und Länge: 200cm) - Gusseisenplatte 12x12x3cm | PV- Freiflächenanlagen: <ul style="list-style-type: none"> • Masthalterung • PV-Module auf zweiter Ebene | 86 kg CO2 equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

Tabelle 2: Fundamentbeschreibung und GWP (Quelle: eigene Berechnung 2022)

Die folgende Abbildung veranschaulicht die Daten der Tabelle in einer Graphik, für eine bessere Übersicht der Zahlen und die verschiedene Größe des GWP in Bezug auf die Fundamente der PV-Anlagen.

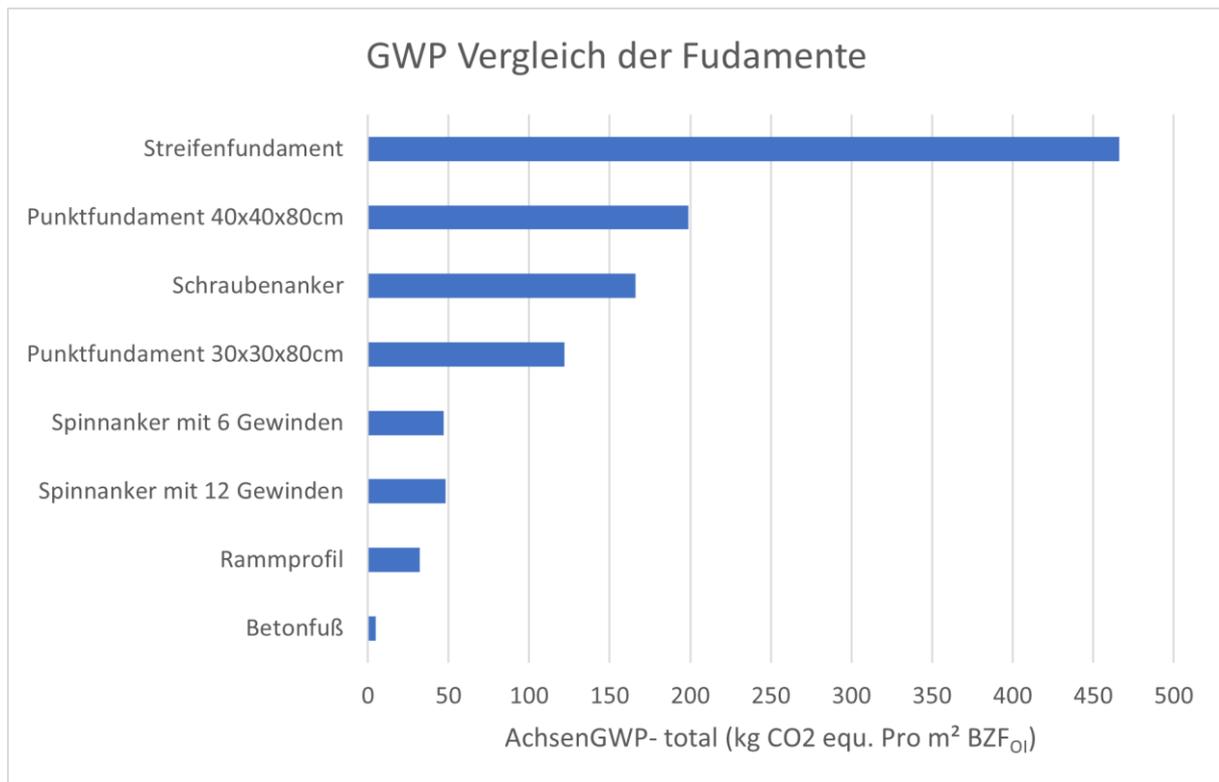


Abbildung 16: Vergleich der GWP von Fundamenten (Quelle: eigene Überarbeitung 2022)

In der vergleichenden Tabelle wird deutlich, dass das Streifenfundament das höchste GWP hat. Zusätzlich ist der Arbeitsaufwand zur Installation im Vergleich zu anderen Fundamenttechniken hoch. Auffällig geringes GWP haben die Spinnanker. Zusätzlich sind diese umfangreich und beinahe für alle Freiflächen-PV-Anlagentypen einsetzbar. Auch das Rammprofil schneidet gut ab.

Für eine Vergleichbarkeit der Anlagentypen werden bei den folgenden Berechnungen der PV-Freiflächenanlagen Spinnanker als Fundamente angenommen, da dieser vielseitig sind und für alle PV-Freiflächenanlagen eingesetzt werden könnten.

3.1.3.2 Freiflächen PV-Anlagen

In dieser Arbeit werden die am häufigsten eingesetzten PV-Freiraumkonstruktionen herangezogen und mit Blick auf deren GWP miteinander verglichen. Die Bemaßung und die gewählten Materialien werden in Anhang angeführt. Für die Berechnung des GWP werden nur die starren Freiflächenanlagen betrachtet, da bewegliche Module nur schwer mit den Aufdachanlagen vergleichbar sind, da diese meist starr sind.

- Module mit Ost-West Ausrichtung in der Freifläche:



Abbildung 17: Module mit Ost- West Ausrichtung in der Freifläche (Quelle: energykonzept.net o.j.)

Bei der Ost- West- Ausrichtung der PV-Module in der Freifläche bilden diese eine dachartige Anordnung. Der Winkel der Module beträgt etwa 15° , was deutlich geringer ist als bei den meisten anderen Aufständerungen. Von Vorteil ist, dass sich die Module dadurch nicht gegenseitig beschatten und eine höhere Dichte der PV-Anlagen erzielt werden kann. Die Freifläche kann sogar zu mehr als 70% mit PV-Modulen bedeckt werden. Wegen der starken Überdeckung ergeben sich ökologisch nachteilige Veränderungen für die Freiflächen. Der Flächenanteil mit Beschattung ist sehr hoch. Daher ist eine deutlich reduzierte Vegetationsentwicklung unter den Modultischen zu erwarten. Dies geht vor allem in Hanglagen mit einer erhöhten Erosionsgefahr der Böden einher (Demuth B. 2019, 20).

- Masthalterung:



Abbildung 18: Solarmodule mit Masthalterung (Quelle: brsolarbracket.com o.j.)

Bei einer Masthalterung ist der Winkel zur Sonne und die Ausrichtung frei einstellbar. Dadurch ist sie sehr flexibel. Die Anzahl der Module pro Mast kann zwischen 2 oder 20 variieren (Bristar o.j.)

- Vertikale bifaziale PV-Anlage:



Abbildung 19: Vertikale bifaziale PV-Anlagen (Quelle: kommunaltopinform.de o.j.)

Vertikale bifaziale PV-Anlagen haben den Vorteil, dass sie nur wenig Fläche überdeckt und dadurch in Kombination mit der Landwirtschaft als sogenannte Agri-Photovoltaik eingesetzt werden können. Sie können auch als Zaun oder Abgrenzung verwendet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Anlagentypen ist, dass sie in Ost-West Richtung ausgerichtet sind und dadurch die Morgen- und Abendsonne genutzt werden kann (Hannen 2022).

- Südausrichtung mit einem Masten:



Abbildung 20: Starre Südausrichtung mit einem Mast (Quelle: memodo.de 2021)

Die PV- Anlagen mit Südausrichtung sind die am meisten verbreiteten PV-Freiflächenanlagen. Der Neigungswinkel beträgt 25° bis 30° bei den üblich in Österreich installierten Anlagen. Bei diesen Anlagen wird der Ertrag zu den Mittagsstunden optimiert und das führt zu einer Produktionsspitze zur Mittagszeit. Zusätzlich müssen die PV-Module einen gewissen Abstand

zueinander haben, damit sie sich nicht gegenseitig beschatten (Wasselak 2013, 233 und Demuth B. 2019, 20).

Durch den Abstand zwischen den Modulen kann die Fläche für zum Beispiel Beweidung mit Schafen genutzt und gleichzeitig gepflegt werden. Die PV-Anlagen dienen auch als Unterstand für die Tiere.

- Starre Südausrichtung mit zwei Masten:



Abbildung 21: Starre Südausrichtung mit zwei Masten (Quelle: solaranlagen-portal.com o.j.)

Dieser PV- Aufständertyp unterscheidet sich kaum von der Südausrichtung mit einem Masten. Nur die Menge und die Durchmesser der Materialien der Aufständertyp unterscheiden sich. Auch das Fundament kann bei zwei Masten geringer sein, da diese Aufständertyp stabiler ist. So kann hier auch ein einfaches Rammprofil verwendet werden.

- Starre Südausrichtung mit Holz Unterkonstruktion:



Abbildung 22: PV-Module mit starrer Südausrichtung mit Holz als Unterkonstruktion (Quelle: sun-consult.de 2006)

Holz ist ein Material, das lokal und regional für den Bau von PV-Unterkonstruktionen herangezogen werden kann. Dabei ist jedoch auf den konstruktiven Holzschutz zu achten, um das Holz haltbar zu bauen. Dennoch wird Holz als Unterkonstruktion in Österreich so gut wie

nicht eingesetzt. Es gibt vereinzelte Großprojekte. Zum Beispiel in Frankreich wird ein Solarpark mit einer Leistung von 250 kW mit Rohholz aus der Umgebung errichtet (Deboutte 2020).

- PV-Module auf zweiter Ebene:



Abbildung 23: PV-Module auf zweiter Ebene (Quelle: Fraunhofer ISE o.j.)

Durch die doppelte Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche, die durch PV-Module auf zweiter Ebene möglich wird, lässt sich Photovoltaik ressourcenschonend auch auf fruchtbaren Flächen ausbauen (Fraunhofer ISE o.j.).

Mit dieser Anwendung von PV-Anlagen kann gleichzeitig landwirtschaftliche Nutzung und PV-Stromproduktion erfolgen. So kann die so genannte „Agri-PV“ die Flächeneffizienz steigern und artenreiche Biotop schaffen. Ein weiterer Vorteil dieses PV-Anlagentyps ist, dass es einen Zusatznutzen für die Landwirtschaft hat, indem es den Boden vor Hagel, Frost und Dürre schützen kann (Fraunhofer ISE o.j.).

Der Nachteil dieser Konstruktion ist der Aufwand und die Materialien der Aufständigung. Diese muss statisch stabil sein und hoch genug, damit ein Traktor darunter ohne Probleme die Fläche bewirtschaften kann.

- PV-Parkplatzüberdachung aus Stahl für ein Auto:



Abbildung 24: PV-Parkplatzüberdachung aus Stahl für ein Auto

Die Überdachung von Parkplätzen mit PV-Anlagen ist eine Doppelnutzung, die in jeglicher Hinsicht Vorteile hat. Meist sind Parkplätze im Freiraum sonnenexponiert und ein Ersatz des Daches mit Paneelen daher sinnvoll.

- PV-Parkplatzüberdachung aus Holz für 1 Auto:



Abbildung 25: PV-Module mit Parkplatzüberdachung für ein Auto (Quelle: meintechblog.de o.j.)

Das Gleiche wie bei der PV-Überdachung mit einer Stahl- Unterkonstruktion gilt auch bei einer Holz-Unterkonstruktion.

- Sonderformen:



Abbildung 26: Solarbaum im urbanen Raum (Quelle: Clarke D. 2008)

Ein Beispiel für Sonderformen von PV-Anlagen im urbanen Raum aber auch in anderen Freiflächen sind die Solarbäume. Diese Form hat einen minimalen Bodenverbrauch, die Solarpaneele sind wie Äste aufgefächert und optimal Richtung Sonne eingestellt. So kann eine maximale Solaroberfläche entstehen und auf den Ort angepasst werden (Gangwar 2021,1). Solarbäume können zusätzlich einen optischen Nutzen haben. Wegen ihrer unterschiedlichen Formen werden sie in dem Vergleich der PV-Unterkonstruktionen nicht miteinbezogen.

- Tabellarische Zusammenfassung der PV-Anlagentypen der Freifläche und Aufbauten in Kombination mit Flächeninanspruchnahme und GWP der Aufbauten

In der folgenden Tabelle werden die PV-Anlagentypen der Freifläche tabellarisch zusammengefasst, um einen Überblick zu erhalten. Einerseits werden die Einsatzbereiche der verschiedenen PV-Anlagentypen übersichtlich aufgezählt. Dies wird in der Tabelle in Zusammenhang mit dem Flächenverbrauch und dem GWP gestellt. Das GWP der Aufständigung bezieht sich nicht auf die PV-Modul. Das Modul ist ein durchschnittliches polikristallines PV-Modul mit den Maßen 170cm Länge, 100cm Breite und 4cm Höhe und hat ein Gewicht von 90kg.

| Freiflächen PV-Anlagen | Einsatzbereich und Doppelnutzungsmöglichkeit | Bodenfläche pro PV-Modul | GWP (Global warming potential) - total (kg CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁) pro Modul |
|--|--|---------------------------------|---|
| <u>Module mit Ost-West Ausrichtung in der Freifläche</u> | <ul style="list-style-type: none"> Keine Doppelnutzung | 1,5m ² | 131 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Masthalterung</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung mit Beweidung | 3,8m ² | 120 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Vertikale bifaziale PV-Anlage</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung als Agri-PV Als Zaun oder Abgrenzung einsetzbar | 8,5m ² | 85 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Starre Südausrichtung mit einem Mast</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung mit Beweidung möglich | 3,5m ² | 137 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Starre Südausrichtung mit zwei Masten</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung mit Beweidung möglich | 3,5m ² | 102 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Starre Südausrichtung mit Holz Unterkonstruktion</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung mit Beweidung möglich | 3,5m ² | 2 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>PV-Module auf zweiter Ebene</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung als Agri-PV | 3,5m ² | 125 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Parkplatzüberdachung aus Stahl für 1 Auto</u> | <ul style="list-style-type: none"> Doppelnutzung mit Parkplatznutzung oder als Überdachung | 1,7m ² | 192 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

| | | | |
|---|---|-------------------|---|
| <u>Parkplatzüberdachung</u> <u>aus Holz für 1 Auto</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Doppelnutzung mit Parkplatznutzung oder als Überdachung | 1,7m ² | 3 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZFO _i |
|---|---|-------------------|---|

Tabelle 3: Typen für PV-Freiflächenanlagen und ihr Einsatzbereich sowie deren GWP (Quelle: eigene Überarbeitung 2022)

In der Tabelle wird deutlich, wie unterschiedlich die einzelne Anlagentypen sein können. Materialien- und Flächen- Inanspruchnahme unterscheiden sich voneinander. Wichtig ist auch der Bezug zum Einsatzbereich und zu den Doppelnutzungen. Obwohl vertikale bifaziale PV-Anlagen mehr Fläche in Anspruch nehmen, können zwischen den Anlagen Felder bestellt werden. Sie stehen daher weiter voneinander entfernt.

Generell ist die Fläche pro Modul relativ zu allen angeführten Anlagentypen gesehen. Diese ist kein absoluter Wert und im Vergleich zu den anderen PV-Anlagen berechnet. Es gibt zwar einen Mindestabstand, der wegen der Sonneneinstrahlung meist nicht unterschritten werden darf, dennoch variiert der Abstand der PV-Anlagen.

3.1.3.3 Gebäudegebundene PV-Anlagen

Abhängig von der Neigung des Daches kann die Verwendung von PV-Anlagen entweder parallel oder in einem Winkel erfolgen. Um die Sonnenausbeute möglichst effizient zu nutzen, wird bei einem Winkel des Daches zwischen 20 bis 50 Grad, eine parallele Konstruktion errichtet, während bei flachen Dächern eine Einstellung zwischen 15 bis 35 Grad erfolgt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Regen die Module säubert und Schnee abrutschen kann (MA20 2021, 24). Die Aufständierungen der PV-Anlagen werden an die Form des Daches angepasst und sind daher von diesem und dessen Ausrichtung abhängig. Die Bemaßung und die Wahl der Materialien werden genauer im Anhang angeführt.

- Dachhaken



Abbildung 27: Dachhaken für Solarmodul (Quelle: Altamira.at o.j.)

Dachhaken werden auf Dächern mit einer Neigung angebracht. Die Module werden direkt in die Haken eingehängt.

- Dachhaken mit Profil

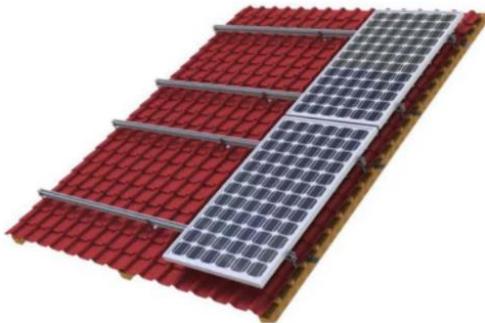


Abbildung 28: Dachhaken mit Profil für Solarmodule (Quelle: bristar o.j.)

Die Schienen werden zusätzlich zu den Dachhaken auf dem Dach zu einer besseren Stabilität angebracht. Auch für diese Konstruktion muss das Dach bereits eine Neigung haben.

- Winkelverstellbares Basismodul



Abbildung 29: Winkelverstellbares Basismodul für ein PV-Modul (Quelle: ECO- WORTHY o.j.)

Das winkelverstellbare Basismodul kann auf Flachdächern aufgestellt werden und in die gewünschte Richtung ausgerichtet werden. Eine Doppelnutzung mit einer Dachbegrünung ist bei dieser Konstruktion möglich.

- Winkelverstellbares Basismodul mit Betonbeschwerungsfuß



Abbildung 30: Winkelverstellbares Basismodul mit Betonbeschwerungsfuß (Quelle: pv-mounting.com o.j.)

Bei dieser Konstruktion gilt das Gleiche wie bei dem einfachen winkelverstellbaren Basismodul, jedoch wird die Konstruktion nicht mit dem Dach verbunden, sondern mit einem Beschwerungsfuß aufgestellt.

- PV-Module mit Ost- West Ausrichtung:



Abbildung 31: Aufdachkonstruktion mit Ost- West- Ausrichtung der PV-Module (Quelle: diconal.de o.j.)

Wie bei den PV-Anlagen mit Ost-West-Ausrichtung in der Freifläche bilden die Module eine dachartige Anordnung. Auch hier beträgt der Winkel der Module 15°. Wegen der starken Überdachung ist eine Begrünung darunter nicht möglich, da kein Licht auf die Dachfläche gelangt.

- Gebäudeintegrierte Bauformen

Eine ästhetischere Variante für den Einsatz von PV-Anlagen stellt die Integration in ein Gebäude dar. Im Gegensatz zu starren Freiflächen PV-Anlagen werden die Module als Ersatz für die Außenfassade verwendet oder in jene integriert. Sie übernehmen daher in verschiedenem Ausmaß eine Funktion des Gebäudes. Es kann beispielsweise eine gewünschte Verschattung übernommen werden. Durch die komplexere Montage und die zusätzlichen Aufgaben, die ein Dachersatz erfüllen muss, wie Wärme- und Lärmschutz, sind die Kosten zumeist höher als Auf-Dach Anlagen (MA20 2021, 25).

Weil in diesem Fall die PV-Paneele andere Materialien ersetzen, wird dies in dieser Arbeit nicht zum Vergleich mit den anderen Typen an Unterkonstruktionen herangezogen.

- Tabellarische Zusammenfassung der PV-Anlagentypen von dachgebundenen Anlagen und Aufbauten in Kombination mit Einsatzbereich und Doppelnutzung sowie deren GWP

In der folgenden Tabelle werden die in dieser Arbeit zum Vergleich herangezogenen gebäudegebundenen PV-Anlagentypen aufgelistet und hinsichtlich ihres Einsatzbereiches und der GWP-Werte der Aufbauten verglichen.

| Gebäudegebundene PV-Anlagen | Einsatzbereich und Doppelnutzungsmöglichkeit | GWP (Global warming potential) - total (kg |
|-----------------------------|--|--|
|-----------------------------|--|--|

| | | CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁) pro Modul |
|--|--|--|
| <u>Dachhaken</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Auf Dächern mit Neigung zwischen 20-50° • Keine Doppelnutzung | 27 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Dachhaken mit Profil</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Auf Dächern mit Neigung zwischen 20-50° • Keine Doppelnutzung | 71 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Winkelverstellbares Basismodul</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Auf Flachdächern • Doppelnutzung mit Dachbegrünung | 58 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Winkelverstellbares Basismodul mit Betonbeschwerungsfuß</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Auf Flachdächern • Doppelnutzung mit Dachbegrünung | 83 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |
| <u>Module mit Ost- West Ausrichtung</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Auf Flachdächern • Keine Doppelnutzung | 71 kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁ |

Tabelle 4: Typen für Gebäudegebundene PV-Anlagen und ihr Einsatzbereich sowie deren GWP (Quelle: eigene Überarbeitung 2022)

Die Tabelle zeigt die genauen Unterschiede zwischen den Aufbauten auf. Aber auch bei Dächern, die bereits eine Neigung haben, müssen die PV-Module mit Dachhaken und Schienen befestigt werden und der Unterschied des GWP zu anderen Aufbauten ist gering.

3.1.4 Interpretation der Daten aus der Lebenszyklusanalyse und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV

Beim Vergleich der Aufbauten von Freiflächen- und Gebäude-PV im Hinblick auf deren GWP kann festgestellt werden, dass Freiflächen-PV einen höheren GWP hat als

gebäudegebundene-PV. Ausreißer stellen die Holz- Unterkonstruktionen dar, weil in diesem Fall das Material Holz einen negativen GWP hat. Bei den anderen Konstruktionen wird deutlich, dass die Menge und die Wahl des Materials ausschlaggebend für das GWP sind. Auch die Fundamente der Freiflächenanlagen sind nicht zu vernachlässigen, da fast alle Dach-PV-Anlagen direkt auf dem Dach angebracht werden und kein Fundament benötigen.

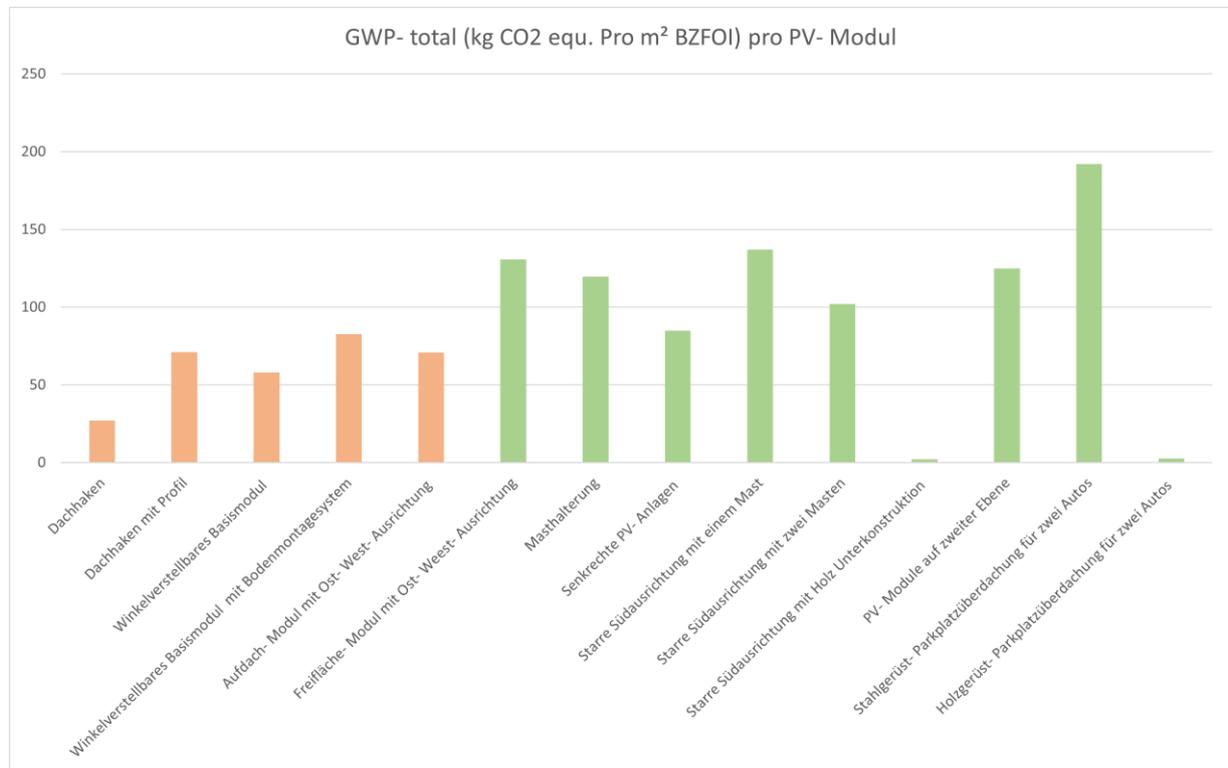


Abbildung 32: GWP der ausgewählten Aufbauten von PV-Anlagen und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV (Quelle: eigene Überarbeitung 2022)

Wenn die Holzunterkonstruktionen außer Acht gelassen werden, haben die Freiflächen PV-Aufständungen, die in dieser Arbeit für den Vergleich gewählt wurden, einen fast 50% höheren GWP als die gebäudegebundenen PV-Anlagen. Dadurch wird deutlich wie viel mehr Material in der Freifläche im Vergleich zu gebäudegebundenen Anlagen eingesetzt werden muss, da sich die Materialien (ausgenommen Holz) zwischen diesen beiden Anlagentypen nur wenig unterscheiden.

3.1.5 Berechnung der „Energy Payback Time“ (EPBT)

Die Energy Payback Time (EPBT) ist die Zeitspanne, die vergeht, bis ein erneuerbares Energiesystem dieselbe Energiemenge generiert hat, die zu dessen Produktion verbraucht wurde (Fethenakis et. al. 2011, 5). Bei den Photovoltaikanlagen hängt die EPBT stark vom Standort der Anlage ab. So unterscheiden sich Studien an verschiedenen Orten der Welt stark

voneinander. Auch die Herkunft und Ausführung der Anlagen ist ausschlaggebend für deren EPBT. Während in der Schweiz laut einer Studie eine polykristalline Solarzelle 2,9 Jahre EPBT hat, liegt in Südeuropa die EPBT für polykristalline Solarzellen bei 1,9 Jahren (Rahmann 2017, 24).

In dieser Arbeit wird die Leistung eines durchschnittlich in Österreich verwendeten polykristallinen PV-Moduls herangezogen. So wird in Österreich auf circa 7 bis 10 Quadratmeter 1kWp Leistung erzeugt (Doormann 2022). Wenn der Durchschnitt von 8,5 Quadratmeter herangezogen wird, bedeutet dies, dass ein Modul mit 1,7 Quadratmeter in etwa 0,2 kWp produziert.

Die nicht erneuerbare Primärenergie (ENRT) die zur Herstellung der Bauteile verwendet wird, wird aus dem Baubook entnommen, mit welchem bereits der GWP der Bauteile berechnet wurde. Es werden dieselben Bauteile angenommen und für diese Berechnung weiterverwendet. Als Primärenergieinhalt (PE) wird der erforderliche Gesamtbedarf an energetischen Ressourcen bezeichnet. Im „PENR“ wird der Primärenergieinhalt aller nicht erneuerbaren Ressourcen (Erdöl, Kohle, etc.) angeführt. Der „PENRT“ enthält sowohl die energetisch als auch die stofflich genutzten Ressourcen.“ (baubook 2022)

Die Formel der EPBT lautet:

$$EPBT = E_{\text{Input}} / E_{\text{Safed}}$$

[Quelle: Nieuwlaar 1997]

Die nachfolgenden Tabellen zeigen wie stark die Aufbauten der PV-Anlagen die EPBT beeinflusst. Zuerst wird die Tabelle der Aufbauten der Gebäude-PV angeführt und dann die der Freiflächen-PV. Im Anschluss werden die Daten für einen schematischen Vergleich in einem Balkendiagramm zusammengefasst.

| PV-Anlagentyp Dachkonstruktionen | EPBT (Jahr) |
|--|--------------------|
| <u>Dachhaken</u> | 0,5 Jahre |
| <u>Dachhaken mit Profil</u> | 1,3 Jahre |
| <u>Winkelverstellbares Basismodul</u> | 1,2 Jahre |
| <u>Winkelverstellbares Basismodul mit Betonbeschwerungsfuß</u> | 1,5 Jahre |
| <u>Module mit Ost- West Ausrichtung</u> | 1,3 Jahre |

Tabelle 5: PV-Anlagentypen für Dachkonstruktionen mit deren EPBT (Quelle: eigene Berechnung 2022)

| PV-Anlagentyp Freiflächenkonstruktionen | EPBT (Jahr) |
|--|--------------------|
| <u>Module mit Ost-West Ausrichtung in der Freifläche</u> | 2,4 Jahre |
| <u>Masthalterung</u> | 2,2 Jahre |
| <u>Vertikale bifaziale PV-Anlage</u> | 1,6 Jahre |
| <u>Starre Südausrichtung mit einem Mast</u> | 2,4 Jahre |
| <u>Starre Südausrichtung mit zwei Masten</u> | 1,7 Jahre |
| <u>Starre Südausrichtung mit Holz Unterkonstruktion</u> | 0,4 Jahre |
| <u>PV-Module auf zweiter Ebene</u> | 2,5 Jahre |
| <u>Parkplatzüberdachung aus Stahl für 1 Auto</u> | 3,6 Jahre |
| <u>Parkplatzüberdachung aus Holz für 1 Auto</u> | 0,5 Jahre |

Tabelle 6: PV-Anlagentypen für Freiflächenanlagen mit deren EPBT (Quelle: eigene Berechnung 2022)

Die Daten werden in der folgenden Graphik veranschaulicht:

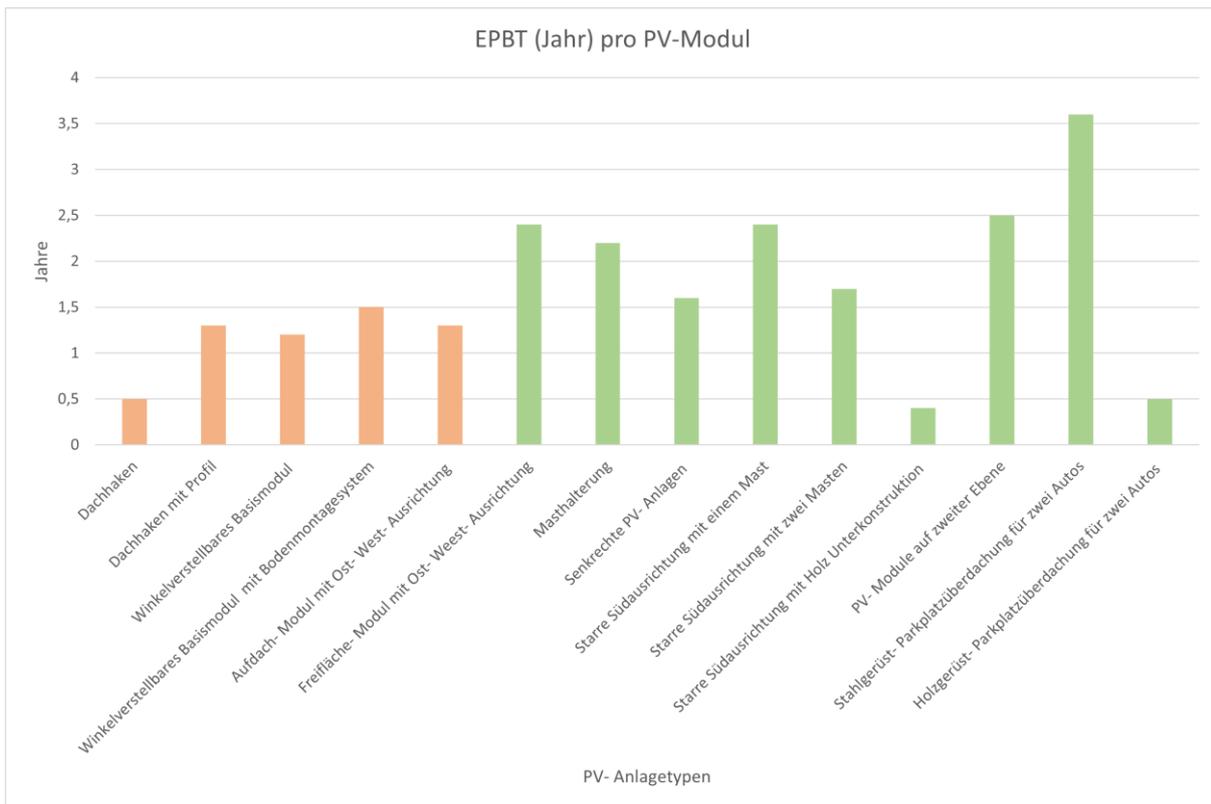


Abbildung 33: EPBT der ausgewählten Aufbauten von PV- Anlagen und Vergleich von Freiflächen- und Gebäude-PV (Quelle: eigene Berechnung 2022)

In der Graphik wird deutlich, dass sich der GWP mit dem EPBT vergleichen lässt. Beide hängen stark von der Menge und von der Wahl der verwendeten Materialien ab. Auch hier bei dem EPBT hat Holz einen sehr geringen Wert im Gegensatz zu Stahl oder anderen Materialien. Zur Vergleichbarkeit mit dem GWP sind auch die bifazialen Module gleich gerechnet worden, obwohl sie durch Ihre höhere Effizienz einen geringeren EPBT haben. Dies bedeutet, dass die bifazialen Module in dieser Berechnung denselben Wirkungsgrad wie polikristalline Module haben.

Zusätzlich ist zu beachten, dass Freiflächen PV-Anlagen immer optimal Richtung Sonne ausgerichtet werden können, PV-Dachanlagen jedoch bei Schrägdächern von der Neigung des Daches abhängig sind. Bei Flachdächern können die Anlagen in den meisten Fällen ebenfalls optimal ausgerichtet werden. Demnach ist die EPBT mit vielen Variablen zu versehen und die Abbildung 34 stellt nur eine Übersicht über die Fragestellung der EPBT-Werte der Anlagentypen dar, die rein auf das Material der Aufbauten bezogen ist und eine durchschnittliche Erzeugung an elektrischer Energie durch PV-Anlagen in Österreich annimmt.

Die Berechnung macht deutlich, dass die Aufbauten die EPBT verlängern können. Dachanlagen haben eine weitaus geringere EPBT als die meisten Freiflächenanlagen. Im

Durchschnitt verlängern die Aufbauten der Aufdachphotovoltaikanlagen die EPBT um circa ein Jahr, während bei Freiflächen-PV die EPBT dadurch um zwei Jahre verlängert wird. Auch hier wurden die Holzkonstruktionen im Durchschnitt nicht mitgerechnet, da Holz-Unterkonstruktionen auf dem Dach nicht eingesetzt werden und deshalb hier nicht direkt vergleichbar sind.

3.1.6 Interpretation der Daten

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse und der EPBT sind rein quantitativ zu betrachten. In diesem Zusammenhang gibt es bei den ausgewählten Anlagentypen einen Unterschied zwischen Gebäude- und Freiflächen-PV. Dieser Unterschied ist deutlich sichtbar und lässt sich quantitativ darstellen. Sowohl bei dem GWP als auch bei der EPBT sind Aufbauten der Freiflächenanlagen aufwändiger als jene der Gebäude-PV. Außerdem ist die Flächeninanspruchnahme der Freiflächenanlagen zu beachten. Dazu müssen die Machbarkeit und die rechtlichen Rahmenbedingungen abgewogen werden.

In den Auflistungen der PV- Anlagentypen wird zusätzlich deutlich, dass es viele qualitative Vor- und Nachteile der Anlagen gibt. Eine Doppelnutzung einer Freifläche mit zum Beispiel einer Schafbeweidung kann einen Vorteil mit sich bringen. Ebenso kann auf dem Dach eine Doppelnutzung mit Dachbegrünung einen Vorteil für die Bepflanzung und PV-Anlage bedeuten.

3.2 Energiemosaik und Nutzenergieanalyse Steiermark 2019

Das Energiemosaik Austria ist Teil einer Strategie, um die Verringerung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemission zu optimieren. Es wurden die Ausgangslagen der Gemeinden dargestellt. Mit dem Energiemosaik wurde eine Methode zur Modellierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemission auf Gemeindeebene entwickelt und österreichweit umgesetzt. Es steht mit dem Energiemosaik allen eine Orientierungshilfe für energie- und klimarelevante Fragestellungen und Planungen zur Verfügung. Mit der Beschreibung der Ausgangslage der Energieproblematik auf Gemeindeebene unterstützt das Klimamosaik Strategien zur Energiewende und zum Klimaschutz (Abart- Heriszt 2019, 1).

Das Energiemosaik und dessen Modell zur Ermittlung von Energieverbrauch und Treibhausgasemission verfolgt einen planungsbezogenen Ansatz. Das Modell geht davon aus, dass sich der Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen auf räumliche Strukturen zurückführen lassen (Abart- Heriszt 2019, 3). Das Energiemosaik stellt aber nicht eine unerlässliche Planungs- und Entscheidungsgrundlage dar, sondern unterstützt

Prozesse zur Findung von Lösungen im Zusammenhang mit energiebezogenen Fragestellungen (Abart- Heriszt 2019,18ff.).

Demnach kann das Energiemosaik mit der Nutzenergieanalyse der Steiermark in Zusammenhang mit dem PV-Ausbau in Weiz und Thannhausen herangezogen werden. Das Energiemosaik beschreibt die Ausgangslage der Gemeinden und deren Gegebenheiten in Bezug auf Energie. Die Nutzenergieanalyse schlüsselt anschließend den Anteil an elektrischem Strom zum gesamten Energieverbrauch auf. Im Zusammenhang mit den Daten und Grundlagen des Energiemosaiks Austria und der Nutzenergieanalyse Steiermark können Zielsetzungen und Planungsgrundlagen festgelegt werden.

3.2.1 Nutzenergieanalyse Steiermark 2019

„Ziel der Nutzenergieanalyse ist die jährliche Bereitstellung von Informationen zu den Einsatzzwecken der Energieträger im Endverbrauch, gegliedert nach Wirtschaftssektoren und Nutzenergiekategorien. Als Datenquellen dazu werden Erhebungen zur Nutzenergie durchgeführt, um die Einsatzstruktur für die verwendeten Energieträger auf der sektoralen Ebene der Energiebilanz zu erstellen.“ (Statistik Austria 2020, 4) Die Einsatzstruktur wird auf den jeweiligen sektoralen energetischen Endverbrauch angewendet. So wird genau aufgeschlüsselt, welcher Teil der verwendeten Energie als Strom verbraucht wird. (Statistik Austria 2020,4)

Für diese Arbeit wird die „energiebilanzkonforme“ Darstellung der Nutzenergieanalyse verwendet. Dies bedeutet, dass für die Berechnung nur standortgebundener Energieverbrauch herangezogen wird. Der motorisierte Individualverkehr, der Verkehr der Wirtschaftssektoren und der Land- und Forstwirtschaft wird nicht berücksichtigt.

Außerdem werden die Daten aus 2019 herangezogen, da diese repräsentativer sind. 2020 weichen die Daten zum Energieverbrauch wegen der Lockdowns der Coronakrise stark ab.

Um die Datenlage der Wirtschaftssektoren aufzuschlüsseln, werden diese separat berechnet und dargestellt. So können Industrie und Gewerbe der Gemeinden nachvollziehbar abgebildet werden.

In der energiebilanzkonformen Darstellung der Nutzenergieanalyse wird in dieser Arbeit der Energieverbrauch durch Wohnen, Land- und Forstwirtschaft, Industrie und Gewerbe und Dienstleistungen von Thannhausen und Weiz berechnet und analysiert.

3.2.2 Strommix und Anteil an erneuerbarem Strom in Österreich

Um zu quantifizieren, wie viel der elektrischen Energie bereits aus erneuerbaren Energiequellen in Österreich entsteht, kann der Strommix herangezogen werden. Der Strommix schlüsselt die prozentuellen Anteile der verschiedenen Energieträger, die zur Stromerzeugung eingesetzt werden, auf (Kranzl 2018, 5).

2016 stammt die Stromerzeugung in Österreich zu 21% aus fossilen Quellen. 43% der elektrischen Energie stammt aus Laufkraftwerken und nur 1% aus Photovoltaikanlagen (Kranzl 2018, 10). Bei einer Quantifizierung des fossilen und nachhaltig erzeugten Stroms wird auch der Stromimport und -export berücksichtigt. Österreich ist ein Nettoimportland, das bedeutet, dass die Stromimporte die Stromexporte übersteigen (Kranzl 2018, 12).

Diese Arbeit hat die Ziele der Energiewende als Grundlage. Außerdem wird die Intention gesetzt, die beiden zu bearbeitenden Gemeinden energetisch unabhängig anzusehen. Demnach wird bei den weiteren Berechnungen neben der Energie aus fossilen Grundlagen auch der Anteil des von PV-Anlagen erzeugten importierten Stroms beachtet.

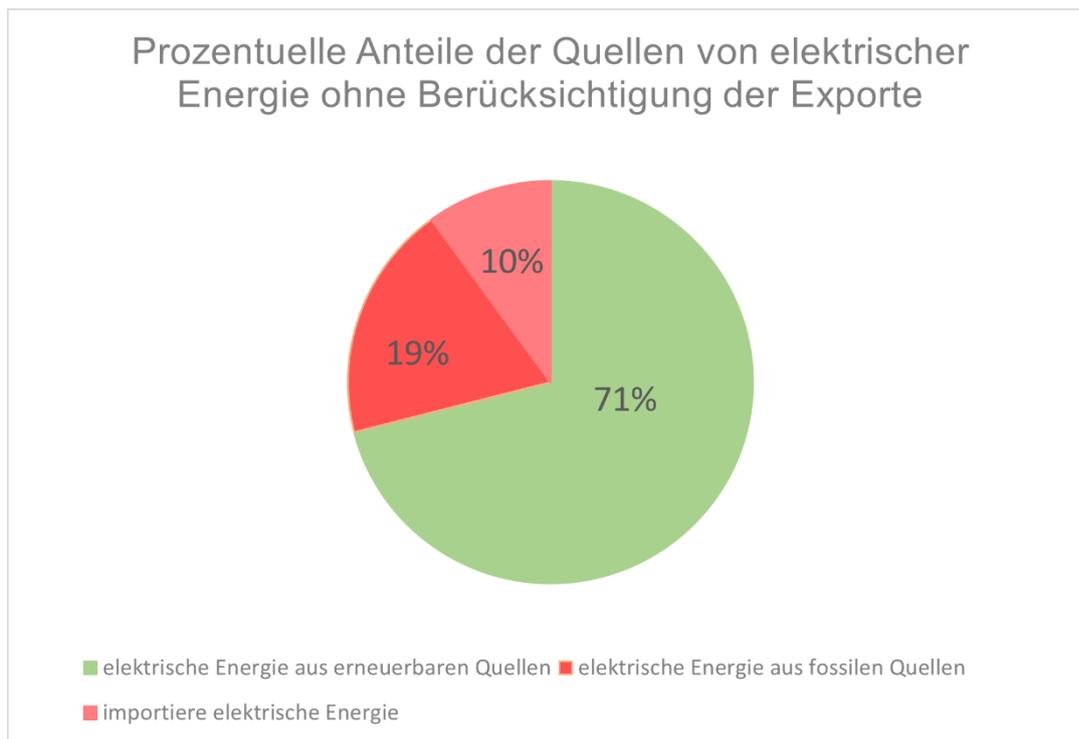


Abbildung 34: Prozentuelle Anteile der Quellen von elektrischer Energie ohne Berücksichtigung der Exporte von Strom aus erneuerbaren Quellen stand 2016 (Quelle: eigene Darstellung 2022)

So sollen in Thannhausen und Weiz **29% der elektrischen Energie von PV-Anlagen erzeugt werden**, um den Zielen der Energiewende zu entsprechen (E-CONTROL 2017).

3.2.3 Energiemosaik und Nutzenergieanalyse der Gemeinde Weiz

Die Gemeinde Weiz wird im Energiemosaik als „Urbanes Zentrum“ bezeichnet und als „Gemeinde mit industriell- gewerblicher Produktion“ beschrieben.

Weiz hat laut des Energiemosaiks vom Stand des Jahres 2019 eine Bevölkerung von 11.701 Einwohnern. Die Fläche beträgt 18 km², wobei 13 km² dem Dauersiedlungsraum angehören. Die Wohnfläche beträgt 586.200 m² und die Kulturfläche 1.000 ha (Albart- Heriszt et. al. 2022c, 2).

Der Energieverbrauch in Weiz beträgt laut des Energiemosaiks insgesamt **532.800 MWh pro Jahr**. Dies wird in der folgenden Grafik prozentuell auf Wohnen, Land- und Forstwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Dienstleistungen und Mobilität aufgeschlüsselt:

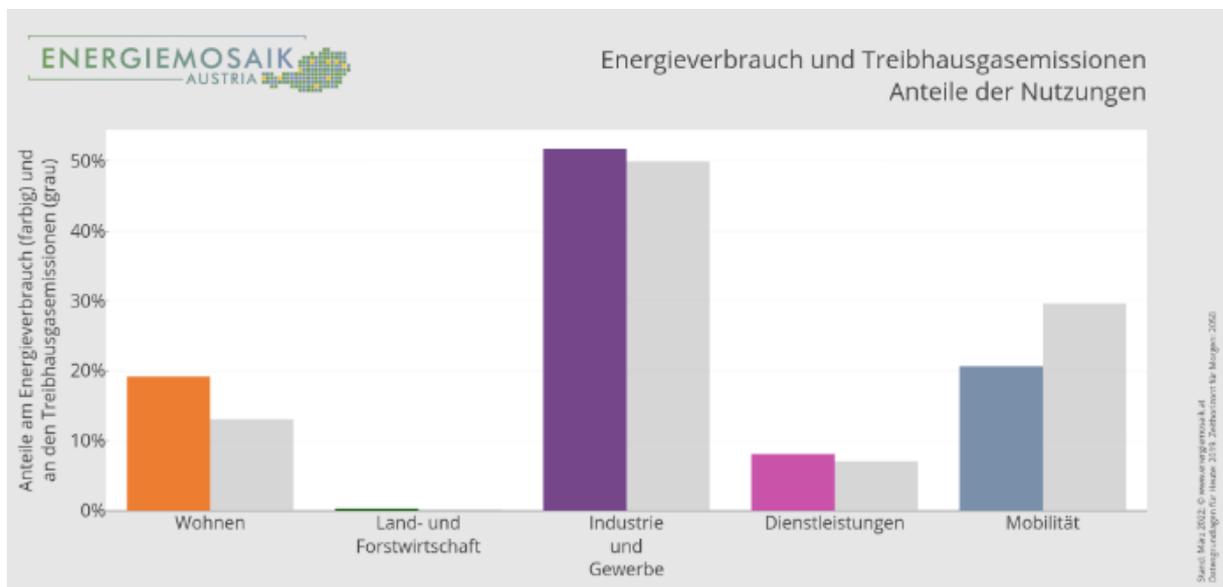


Abbildung 35: Energieverbrauch und Treibhausgasimmissionen Anteile der Nutzungen der Gemeinde Weiz (Quelle: Albart- Heriszt et. al. 2022c, 3)

An den Anteilen der Nutzungen wird veranschaulicht, dass Weiz ein im Vergleich zu den anderen Nutzungen großes Industriegebiet hat. Es wird auch deutlich, dass ein Großteil der Fläche verbaut ist, da es kaum Land- und Forstwirtschaft gibt. Auch Straßen und Mobilität spielen eine bedeutende Rolle im Energieverbrauch der Gemeinde. Für die Berechnung des Energieverbrauchs an elektrischer Energie in Weiz wird in dieser Arbeit der Verkehr in der energiebilanzkonformen Darstellung nicht berücksichtigt.

| | Wohnen | Land- /Forstwirt- schaft | Industrie und Gewerbe | Dienstleis- tungen | Summe: |
|---|------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Energiever- brauch insgesamt | 102.200 MWh/a | 1.800 MWh/a | 275.600 MWh/a | 43.200 MWh/a | 422.800 MWh/a |
| Anteil an elektrischer Energie | 24.528 MWh/a | 648 MWh/a | 143.420 MWh/a | 21.600 MWh/a | 190.196 MWh/a |

Tabelle 7: Energiebilanzkonformer Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Weiz in MWh/a (Quelle: eigene Darstellung 2022)

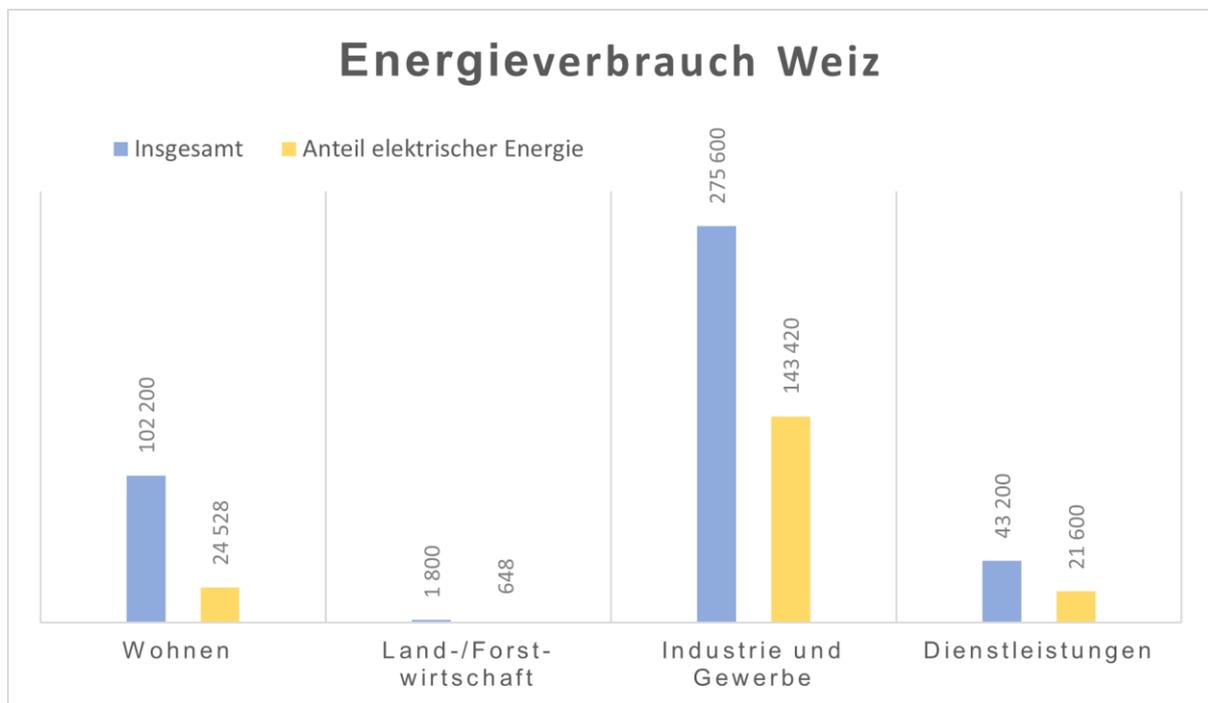


Abbildung 36: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022)

Die Tabelle und die Graphik aus der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 stellen den tatsächlich verbrauchten elektrischen Strom in Weiz dar (Statistik Austria 2020). In der Graphik wird deutlich, dass der Anteil an elektrischer Energie vor allem im Bereich Dienstleistungen, sowie Industrie und Gewerbe bei etwa 50% liegen. Beim Wohnen liegt der Anteil bei 24% und bei Land und Forstwirtschaft bei 36%.

Um die einzelnen Branchen von Industrie und Gewerbe besser überblicken zu können, werden diese in der folgenden Graphik gesondert dargestellt:

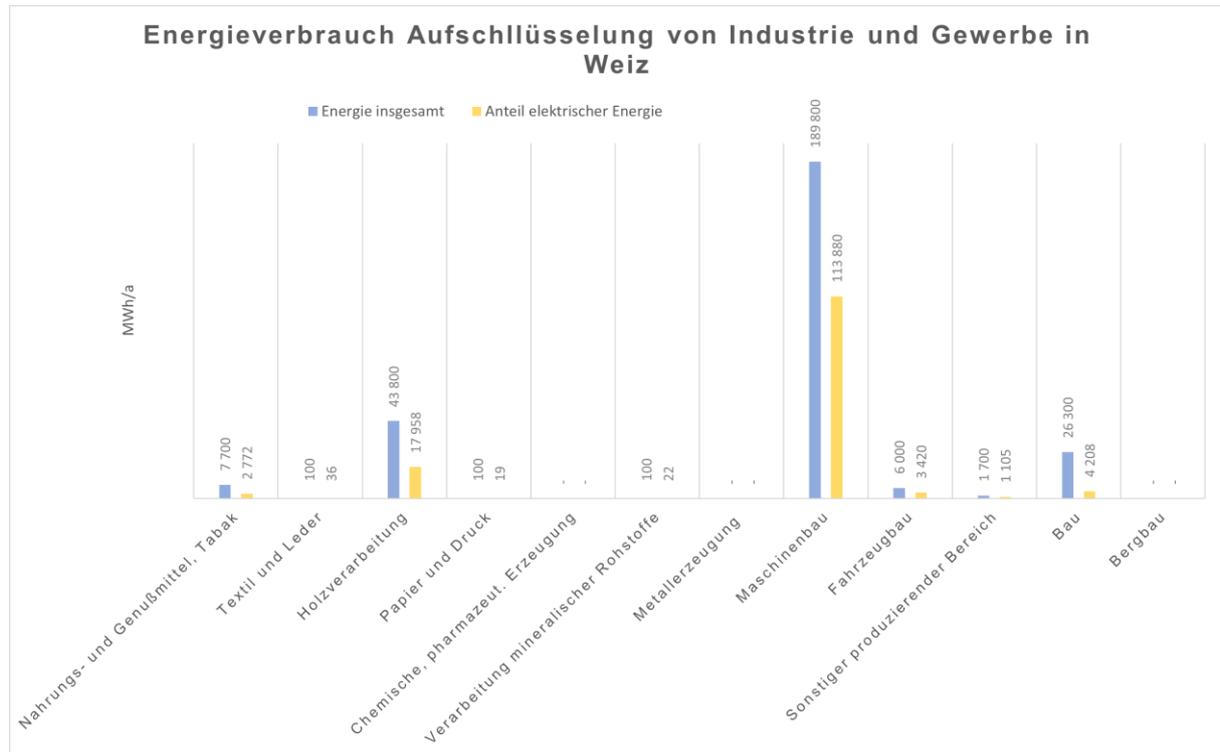


Abbildung 37: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie von Industrie und Gewerbe in der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022)

Die Graphik zeigt, dass Maschinenbau in Weiz einen hohen Stellenwert hat und dort der meiste elektrische Strom verbraucht wird (Statistik Austria 2020).

Zusätzlich kann aus dem Strommix 2016 entnommen werden, dass 71% der elektrischen Energie in Österreich bereits aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. So blieben 29% über, welche hier durch die Errichtung von PV-Anlagen produziert werden sollten.

Der elektrische Strom, der in Weiz durch PV-Anlagen abgedeckt werden soll, beträgt **55.156 MWh/a**. Dies sind 10% des gesamten Energieverbrauchs in Weiz.

3.2.4 Energiemosaik und Nutzenergieanalyse der Gemeinde Thannhausen

Die Gemeinde Thannhausen wird im Energiemosaik mit dem Typ „Ländlicher Raum im Umland von Zentren“ eingeteilt. Außerdem wird sie als „Gemeinde mit industriell- gewerblicher Produktion“, wie auch die Gemeinde Weiz, beschrieben.

Thannhausen hat laut des Energiemosaiks, das den Stand des Jahres 2019 hat, eine Bevölkerung von 2.439 Einwohnern, also deutlich weniger als Weiz. Die Fläche beträgt 34

km², wobei nur 14 km² zum Dauersiedlungsraum gehören. Die Wohnfläche beträgt 114.600 m² und die Kulturfläche 2.950 ha.

Der Energieverbrauch in Thannhausen beträgt laut des Energiemosaiks insgesamt **58.300 MWh pro Jahr**, also deutlich weniger als bei der Gemeinde Weiz. Der Energieverbrauch von Thannhausen wird in der folgenden Grafik prozentuell auf Wohnen, Land- und Forstwirtschaft, Industrie und Gewerbe, Dienstleistungen und Mobilität aufgeschlüsselt:

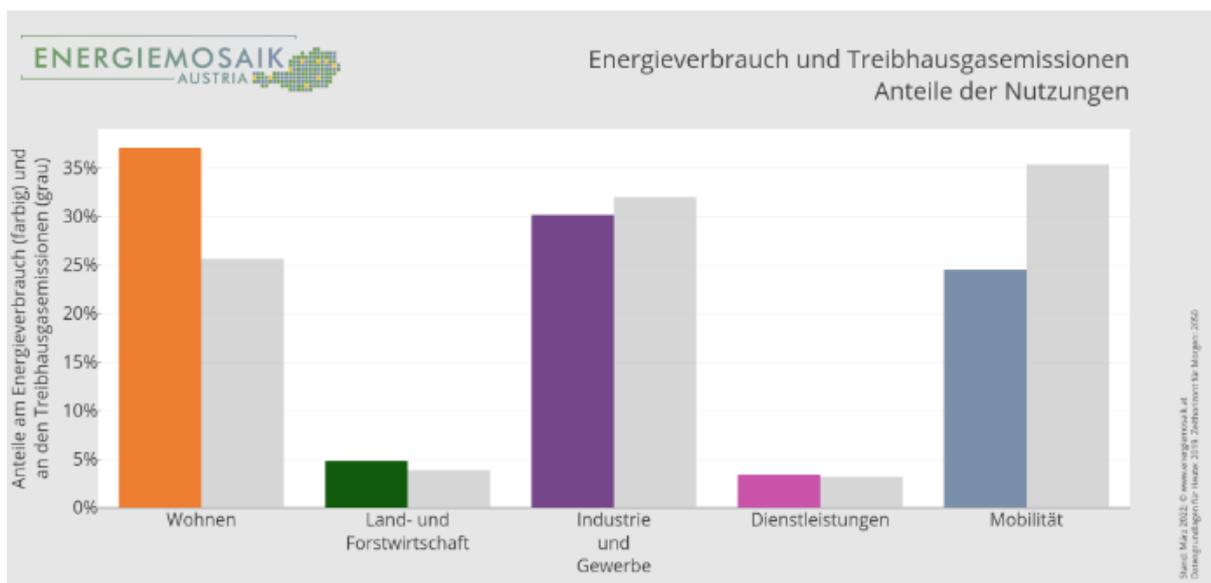


Abbildung 38: Energieverbrauch und Treibhausgasimmissionen Anteil der Nutzungen der Gemeinde Thannhausen (Quelle: Albart- Heriszt et. al. 2022b, 3)

In der Grafik wird der Unterscheid zu Weiz deutlich. Die Industrie hat hier einen geringeren Anteil als Wohnen. Auch Land- und Forstwirtschaft haben einen deutlichen Anteil an der Verwendung der Energie. In Thannhausen wird wie in Weiz die Mobilität vernachlässigt und die energiebilanzkonforme Darstellung der Daten und der Nutzenergieanalyse herangezogen.

| | Wohnen | Land- /Forstwirt- schaft | Industrie und Gewerbe | Dienstleis- tungen | Summe: |
|---|------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| Energiever- brauch insgesamt | 102.200 MWh/a | 1.800 MWh/a | 17.600 MWh/a | 2.000 MWh/a | 44.000 MWh/a |
| Anteil an elektrischer Energie | 5.184 MWh/a | 1.008 MWh/a | 4.030 MWh/a | 1.000 MWh/a | 11.222 MWh/a |

Tabelle 8: Energiebilanzkonformer Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Thannhausen in MWh/a (Quelle: eigene Darstellung 2022)

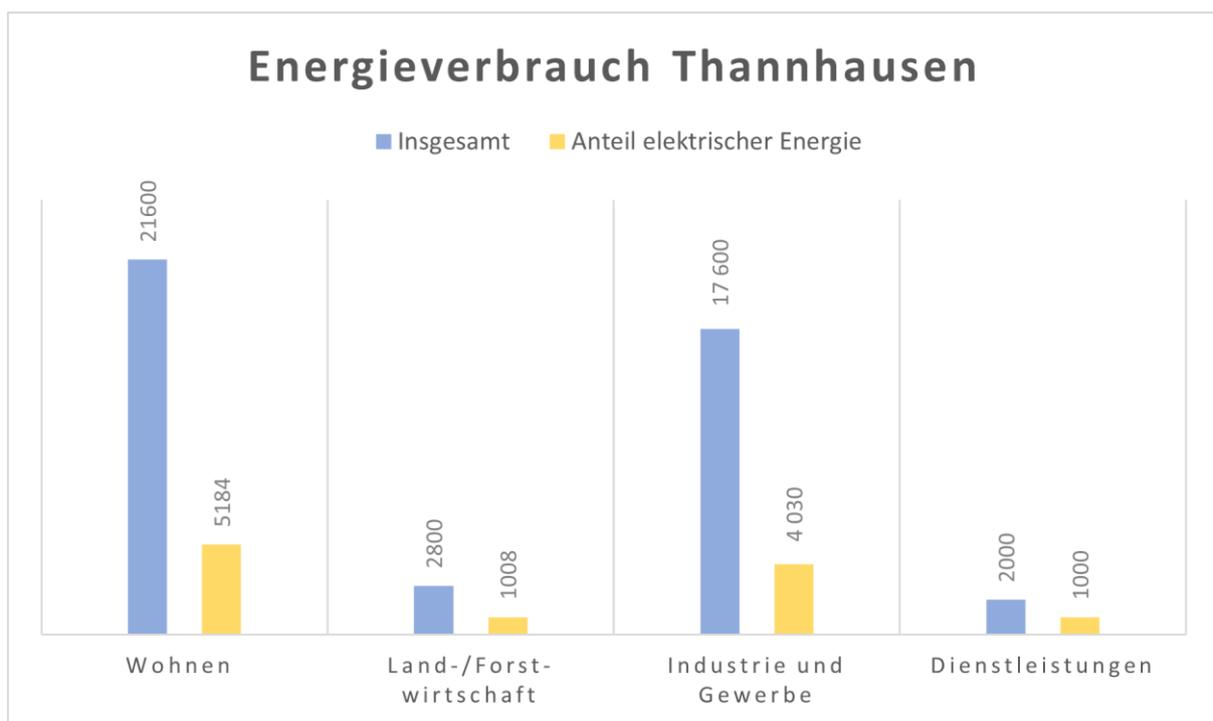


Abbildung 39: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie der Gemeinde Thannhausen anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022)

Die Aufschlüsselung der Quellen des Energieverbrauchs zeigt in Thannhausen, dass für Wohnen zwar der größte Anteil an Energie gebraucht wird, dass aber der Stromverbrauch fast mit dem der Industrie gleichzusetzen ist, da die Industrie einen höheren Anteil an elektrischer Energie am Gesamtenergieverbrauch hat (Statistik Austria 2020).

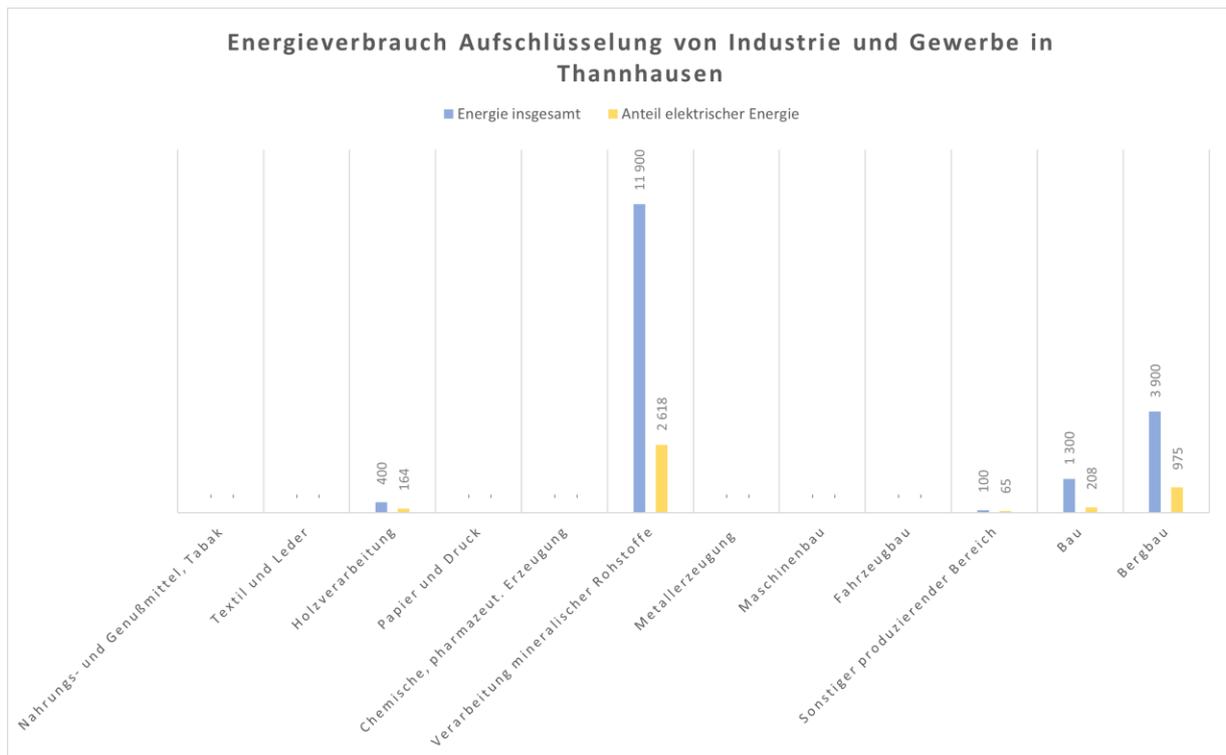


Abbildung 40: Energieverbrauch und Anteil an elektrischer Energie von Industrie und Gewerbe in der Gemeinde Weiz anhand der Daten aus der der Nutzenergieanalyse der Steiermark 2019 (Quelle: eigene Darstellung 2022)

Die Industrie in Thannhausen ist nur 3% so groß wie jene in Weiz, dennoch spielt sie beim Verbrauch der elektrischen Energie in Thannhausen eine bedeutende Rolle. In der Aufschlüsselung wird deutlich, dass es nur kleine und wenige Betriebe in Thannhausen gibt.

Zusätzlich kann aus dem Strommix 2016 entnommen werden, dass 71% der elektrischen Energie in Österreich bereits aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. So blieben 29% über, welche hier durch PV-Anlagen produziert werden sollen.

Der elektrische Strom, der für die Berechnung der benötigten PV-Anlagen in Thannhausen herangezogen wird, beträgt **3.254 MWh/a**. Dies sind 6% des gesamten Energieverbrauchs in Thannhausen.

3.3 GIS- Analyse in der Gemeinde Weiz und Thannhausen, Österreich

Für die Entwicklung einer Energiestrategie und nachhaltigen Planung im Bereich PV sind räumliche Kontexte in die Fragestellung eingebettet. Die Optionen für Ausbaustrategien sind von den räumlichen Gegebenheiten, ob städtische, vorstädtische oder ländliche Gebiete betroffen sind, geprägt. Sowohl die Energieeffizienz als auch die Potentiale erneuerbarer Energie werden vom räumlichen Kontext bestimmt. Deshalb ist die Raum- und Energieplanung

zusammenzuführen, um Nachhaltigkeitsziele zu erreichen und die Energiewende zu schaffen (Stoeglehner 2020,473).

In diesem Kapitel wird ein Beispiel für die Planung von PV-Anlagen in der Gemeinde Weiz und Thannhausen gebracht. Die Gemeinden haben räumlich unterschiedliche Voraussetzungen und unterschiedliche Anforderungen bezüglich Energie und Planung. Für die Berechnung der Flächen, welche für Dach PV-Anlagen zur Verfügung stehen, wird das Photovoltaikpotential aus dem steiermärkischen GIS herangezogen.

3.4 GIS-Analyse

Die GIS-Analyse gibt ein Beispiel für den möglichen Einsatz von PV-Anlagen in Weiz und Thannhausen. Mit den Daten, die vom Land Steiermark bezüglich PV-Dachpotential von Gemeinden zur Verfügung gestellt werden, kann eine Aussage darüber getroffen werden, was in den jeweiligen Gemeinden möglich wäre und wie viel der benötigten elektrischen Energie durch PV-Anlagen abgedeckt werden könnte. Dazu werden die kWh innerhalb der Gemeindegrenzen, die über Dach-PV erzeugt werden können, mittels der GIS-Software angezeigt und können in eine Excel-Datei übertragen werden, um sie zu addieren. Die Daten des steiermärkischen GIS beinhalten die Potentiale für PV-Dachanlagen. Für die Freiflächen kann eine Annahme anhand der Agrar- und Brache-Flächen getroffen werden. Wegen des geringen GWP und der geringeren Nutzungskonflikte der Dach-PV wird dieses Potential zuerst genauer betrachtet. Wenn der Bedarf an elektrischer Energie nicht mit der Dach-PV abgedeckt werden kann, wird auf die Freifläche erweitert.

3.4.1 GIS- Analyse Weiz

Weiz ist die einwohnermäßig größte Stadt der Region Oststeiermark und gilt als Industriestadt. Die Gemeinde Weiz schließt direkt an Weiz an. Dennoch sind die beiden Gemeinden in Bebauung, Industrie, Land- und Forstwirtschaft verschieden situiert. In der folgenden Abbildung ist die Gemeindegrenze und die Aufteilung zwischen bebauter und nicht bebauter Fläche gut zu erkennen. Das bebaute Gebiet und die Industrie erstreckt sich entlang der Hauptverkehrsader, der Gleisdorfer Straße.

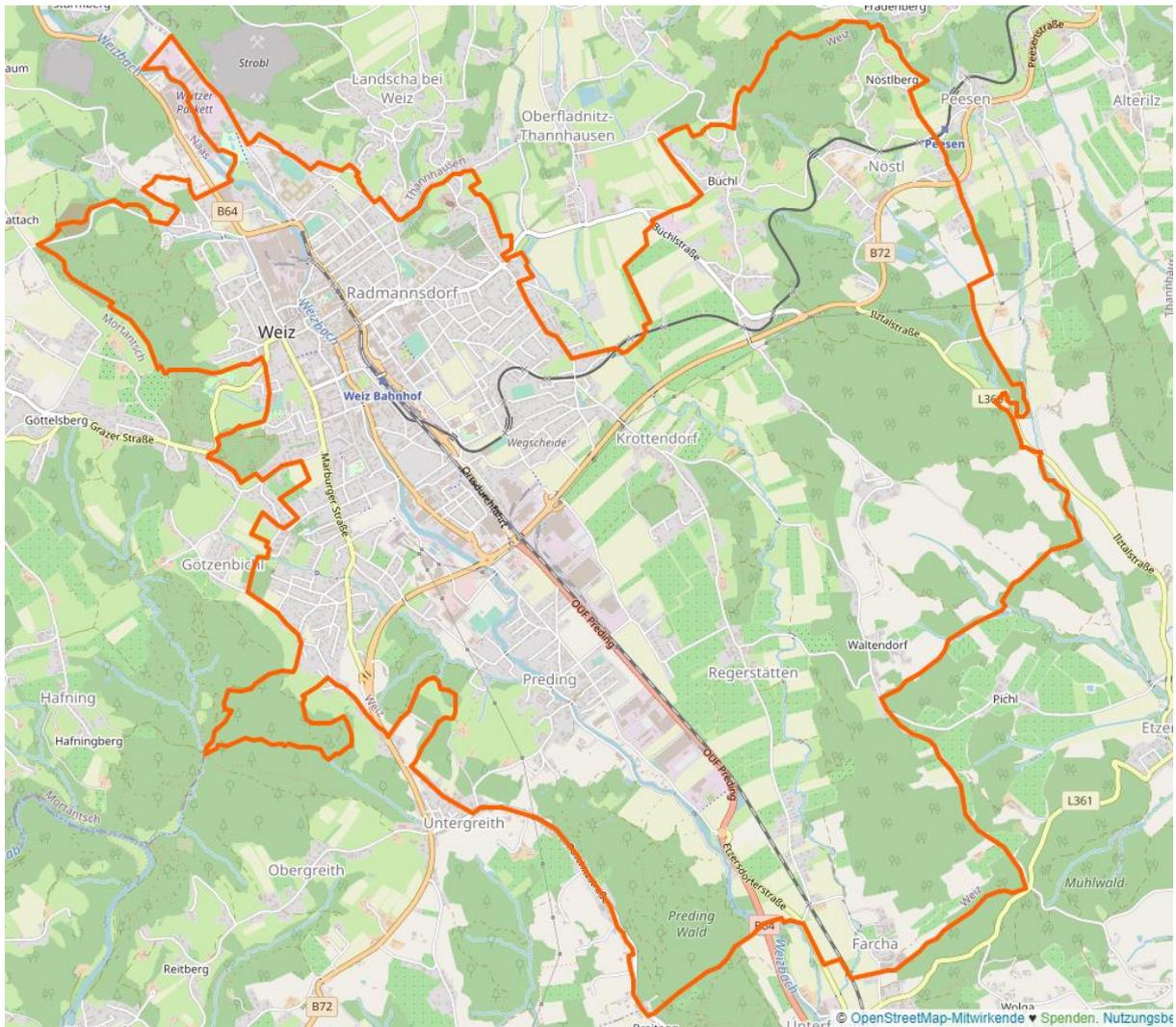


Abbildung 41: Gemeindegrenze Weiz (Quelle: Open Street Map 2022)

Weiz hat einen energiebilanzkonformen Verbrauch an elektrischer Energie von **190.196 MWh/a**. Davon werden etwa 71% bereits aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen. Daher sollen **55.156 MWh/a** durch PV-Anlagen ersetzt werden, um die Ziele der Energiewende in Weiz mit der PV-Technologie zu ermöglichen.

Aus dem Solardachkataster Steiermark, der die Potentialflächen für Photovoltaikanlagen auf Dachflächen ermittelt, kann herausgerechnet werden, dass in Weiz **22.115 kWp** durch PV-Dachanlagen abgedeckt werden könnten (Land Steiermark 2022). Wegen des hohen Stromverbrauchs durch die Industrie in Weiz deckt dies nur 40% des Bedarfs an elektrischer Energie ab. Dies bedeutet, dass **33.041 kWp** in der Freifläche generiert werden müssten.

Weiz hat eine Kulturfläche von 1.000 ha. Wenn 100% der elektrischen Energie durch PV-Anlagen abgedeckt werden sollen, müssten durchschnittlich, bei der Verwendung von

polykristallinen Solarzellen, **33 ha** der Kulturläche mit Solarzellen abgedeckt werden. Dies sind in etwa 3 % der Kulturläche.

3.4.2 GIS-Analyse Thannhausen

Thannhausen schließt nordösterlich direkt an Weiz an. Dennoch wird auch im Grundrissplan deutlich, dass die Gemeinden unterschiedliche räumliche Voraussetzungen haben. Die Bebauung liegt verstreut über das Gemeindegebiet und die Kulturlächen überwiegen die bebauten Flächen.

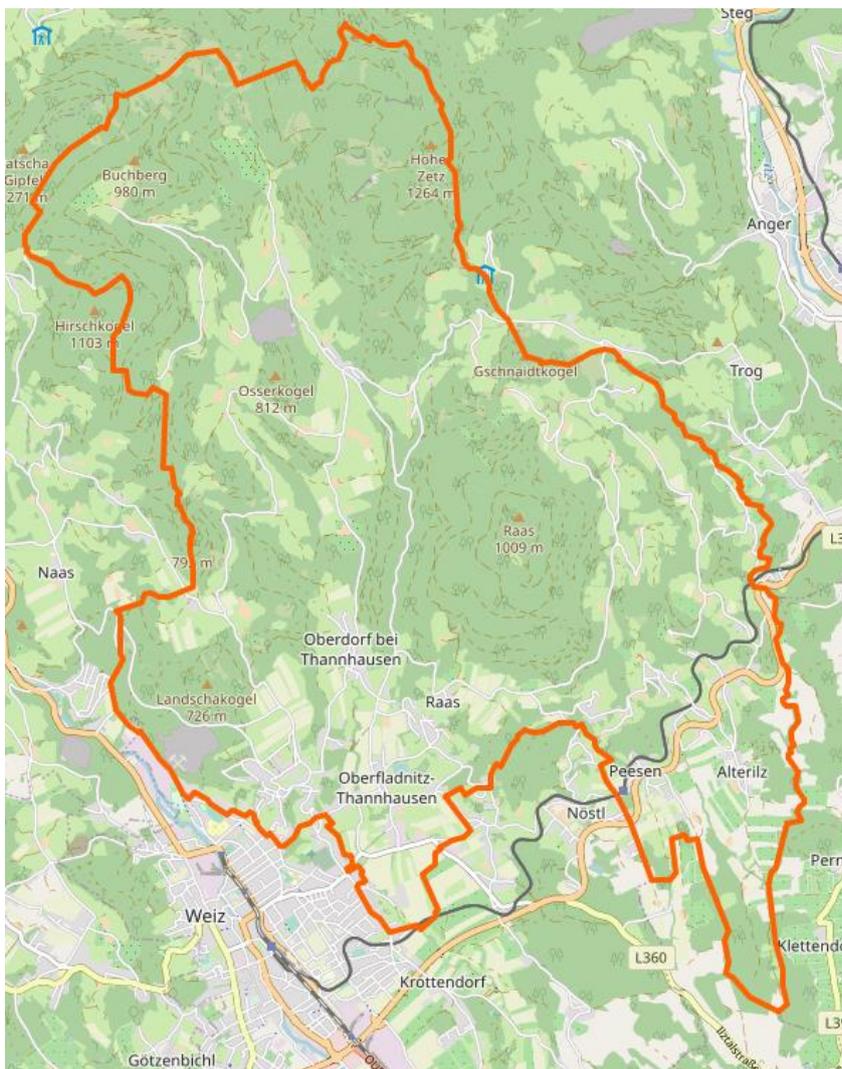


Abbildung 42: Gemeindegrenze Thannhausen (Quelle: Open Street Map 2022)

Thannhausen hat einen energiebilanzkonformen Verbrauch an elektrischer Energie von **11.222 MWh/a**. Davon werden auch hier etwa 71% bereits aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen. Daher sollen in Thannhausen **3.254 MWh/a** durch PV-Anlagen ersetzt werden, um die Ziele der Energiewende mit der PV-Technologie zu ermöglichen.

Aus dem Solardachkataster Steiermark, der die Potentialflächen für Photovoltaikanlagen auf Dachflächen ermittelt, kann herausgerechnet werden, dass in Thannhausen **5.361 kWp** durch PV-Dachanlagen abgedeckt werden könnten (Land Steiermark 2022). Dies bedeutet, dass in Thannhausen, wenn das PV-Dachpotential ausgenutzt ist, zusätzlich **2.107 kWp** überbleiben. Demnach müsste Thannhausen nicht in die Freifläche gehen, um 100% des Bedarfs an elektrischer Energie abzudecken.

3.4.3 Vergleich von Thannhausen und Weiz anhand der GIS- Daten und des Energieverbrauchs der Gemeinden

Die GIS- Analyse zeigt auf, wie unterschiedlich die beiden Gemeinden sind, obwohl sie nebeneinander liegen. Zusätzlich kann die Wichtigkeit einer räumlichen Kooperation in Energie- und Raumfragestellungen aufgezeigt werden.

In Thannhausen könnte mit PV-Dachanlagen 2.107 kWp mehr elektrische Energie erzeugt werden als in dieser Gemeinde verbraucht werden würde. Diese Energie könnte in Weiz eingesetzt werden, auch wenn der Bedarf dort dadurch immer noch nicht abgedeckt ist.

Trotzdem ist zu beachten, dass die Ergebnisse dieser Überlegung den energiebilanzkonformen Verbrauch der Energie der beiden Gemeinden berücksichtigt. Mit Integration der Mobilität und dem Anstieg der Wichtigkeit der e- Mobilität steigt der Verbrauch der elektrischen Energie beträchtlich.

Die Ergebnisse der GIS-Daten und die Daten des Energiemosaiks und der Nutzenergieanalyse zeigen zusätzlich die Ausbaupotentiale der beiden Gemeinden auf. Die Leitfäden zu PV-Anlagen der Steiermark konzentrieren sich auf die PV-Freiflächenanlagen. Die PV-Installationen auf Dächern werden kaum erwähnt trotz des hier aufgezeigten Potentials der Dachflächen.

In diesem Zusammenhang sollte zusätzlich beachtet werden, dass im Rahmen dieser Arbeit nur das technische Potential zur Berechnung herangezogen wurde.

3.5 Zusammenfassung der GIS-Analyse mit den Ergebnissen der Lebenszyklus-Analyse

Die Lebenszyklusanalyse und die Flächeninanspruchnahme geben einen quantitativen Rahmen zur Wahl des PV-Anlagentyps. Die GIS- Analyse gibt den Daten einen räumlichen Rahmen. Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse im Zusammenhang mit dem GWP zeigen eindeutig, dass bei diesen PV-Anlagentypen das GWP bei gebäudegebundenen PV-Anlagen niedriger ist als in der Freifläche. Die GIS- Analyse demonstriert am Beispiel der ausgewählten

Gemeinden die Möglichkeiten des energietechnischen Potentials der PV-Anlagen. Die Kombination der Ergebnisse zeigt die Wichtigkeit des Standortes und der richtigen Wahl des PV-Anlagentyps auf. Neben dem generellen Vergleich zwischen Freifläche und Gebäude PV-Anlagen stellt die Analyse konkrete Unterschiede der Materialien und Standortwahl in Zusammenhang mit Doppelnutzungen dar. So kann die Installation überlegt und effektiv erfolgen.

4 Diskussion

Im Zusammenhang mit den gewählten Methoden hat sich die Hypothese der Arbeit bestätigt. In Hinblick auf die Konstruktionen von Freiflächen- und gebäudegebundenen PV-Anlagen gibt es einen relevanten Unterschied bezüglich der CO₂ Bilanz. Die Unterschiede beziehen sich auf die Materialwahl und auf die Menge der verwendeten Materialien. Räumlich ist der Unterschied qualitativer zu bemerken, da einzelne Anlagen verschiedene Voraussetzungen und Doppelnutzungen bieten.

Um genauer auf die Forschungsfragen einzugehen, kann in Bezug auf die betrachteten Anlagentypen die Aussage getroffen werden, dass generell gebäudegebundene PV-Anlagen effizienter bezüglich der Ökobilanz und Flächeninanspruchnahme sind. Diese Aussage muss aber die Rahmenbedingungen ebenfalls in Betracht ziehen. Freiflächenanlagen sind meist effizienter hinsichtlich der Energiegewinnung, da sie immer optimal ausgerichtet sein können und zusätzlich ergibt sich eine Doppelnutzung, wenn die Fläche trotz PV-Anlage bewirtschaftet werden kann.

Falls aber ausschließlich auf einer quantitativen Ebene die Lebenszyklusanalyse betrachtet wird, so haben die Aufbauten der Gebäude PV-Anlagen ein niedrigeres GWP als Freiflächen-PV-Anlagen. Im Durchschnitt kann sogar gesagt werden, dass bei den ausgewählten Typen der Unterschied im GWP zwischen Gebäude- und Freiflächen-PV bei bis zu 50% liegt (ausgenommen die Holz-Unterkonstruktionen). Der Unterschied des GWP der Holz-Unterkonstruktion von PV-Anlagen zeigt die Relevanz der Materialwahl und die Wichtigkeit der konkreten Standorte und PV-Anlagentypwahl. Denn nicht jeder PV-Anlagentyp kann an jedem Standort befestigt werden.

Die Landnutzung und Flächeninanspruchnahme steht ebenfalls in Verbindung zum Standort des PV-Anlagentyps. Die GIS-Analyse zeigt die Relevanz des Standortes zusätzlich zur Lebenszyklusanalyse. Jeder Ort hat unterschiedliche Potentiale, die genutzt und auf die eingegangen werden muss, um eine nachhaltige Planung zu ermöglichen. Zusätzlich sind auch hier die Doppelnutzung und die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die Konfliktpotentiale zu beachten. Diesbezüglich ist auf die Wahl der Anlage zu achten. Generell kann in den ausgewählten Beispielgemeinden Weiz und Thannhausen gesagt werden, dass

es ein großes energietechnisches Potential für Solaranlagen sowohl in der Freifläche als auch an Gebäuden gibt. Dies unterscheidet sich jedoch vom realisierbaren Potential. So kann der PV-Ausbau, wenn die gesamte elektrische Energie aus PV-Anlagen kommen soll, nur in Thannhausen allein mit dachgebundener Photovoltaik von statten gehen. In Weiz ist dieses nicht möglich. Dies ist als theoretisches Anwendungsbeispiel zu sehen und ist im räumlichen und energetischen Kontext kritisch zu betrachten, da die PV nur eine mögliche Form der erneuerbaren Produktion von elektrischer Energie ist und auch die Speicherung ebenso eine Rolle spielt. Daher ist zu beachten, dass die Ergebnisse ein Ausschnitt aus dem Gesamtkontext sind und mit diesem korrelieren und zum Finden von energetisch konkreten Lösungen beitragen können.

Auch die durch die Literatur gewonnenen Erkenntnisse können im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Arbeit interpretiert werden. Besonders auf der Ebene der Leitfäden der Steiermark und Österreich. Die Leitfäden bearbeiten die Standortwahl und die Konfliktpotentiale auf sozialer und ökologischer Ebene. Diese Arbeit geht diesbezüglich weiter ins Detail mit der Fragestellung der Material- und Typ-Wahl der PV-Anlagen. Vor allem das Thema Holz in Zusammenhang mit Nachhaltigkeit wird in den Ergebnissen deutlich aufgezeigt. Demnach kann der Lebenszyklus eine weitere Orientierungshilfe für die Entscheidung in Bezug zum Standort sein. Jeder Standort hat umweltrelevante Wirkungsprofile und diese sollten in Hinblick auf die PV-Anlagentyp-Wahl, vor allem in der Freifläche, beachtet werden. Dennoch zeigen die Ergebnisse auch die zentrale Wichtigkeit der dachgebundenen PV-Anlagen, einerseits wegen des theoretischen energietechnischen Potentials für die beiden Gemeinden, andererseits wegen des Unterschieds im GWP der Unterkonstruktionen. Obwohl die dachgebundenen PV-Anlagen oft weniger effektiv sind und häufig höhere Kosten in der Errichtung verursachen, können diese Aspekte auch mit einer Doppelnutzung ausgeglichen werden. Eine geplante Dachbegrünung kann zum Beispiel mit PV-Anlagen aufgewertet werden. Diese Vorteile können auch bei gewissem Saatgut in der Freifläche erkannt werden.

Generell ist zu sagen, dass der Fokus der Leitfäden auf Ökologie, Landschaftsbild und Wirtschaftlichkeit der PV-Anlagen liegt. Die Ergebnisse der Arbeit liefern diesbezüglich einen Beitrag zur Einordnung von PV-Anlagentypen und deren Aufbauten.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus der Arbeit können mehrere Schlussfolgerungen getroffen werden. Wie in der Diskussion schon erläutert, ist die Grundaussage, dass es einen deutlichen Unterschied zwischen Dach- und Freiflächen PV-Anlagen hinsichtlich GWP und EPBT gibt. Dennoch ist das Ergebnis immer aus mehreren Sichtweisen zu betrachten und nur ein Teil der Fragestellung, um eine ökologische, technische, soziale und effektive Planung zu ermöglichen. So reichen selbst in den untersuchten Beispielen die Dachfläche nur in Thannhausen aus, um den Bedarf an elektrischer Energie abzudecken. In Weiz ist das technische Potenzial von PV-Dachanlagen bei Weitem nicht ausreichend, um den Bedarf an elektrischer Energie abzudecken. Zusätzlich wurde die Mobilität in der Berechnung der elektrischen Energie außer Acht gelassen. Mit dem Anstieg der e- Mobilität wird diese auch noch zusätzlich relevanter werden. Außerdem wurde das reiche energietechnische Potential der Dachflächen abgeschätzt, das realisierbare Potential ist viel geringer und nur schwer abzuschätzen. Zudem sind rechtlich und gesellschaftlich Freifläche-PV-Anlagen leichter und mit höherem Ertrag umzusetzen.

Dennoch stellt die Arbeit die Wichtigkeit der räumlichen Komponenten und die Berücksichtigung der Doppelnutzung und der Typen der PV-Aufbauten dar.

Nach der Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit ergeben sich jedoch weitere Fragestellungen. Eine zentrale Frage ist die genaue EPBT der Anlagen in verschiedenen Bereichen Österreichs und der genaue Vergleich zwischen Freiflächen- und Dach-PV-Anlagen. Diese Arbeit gibt nur eine grobe Abschätzung darüber ab und geht bei der Freifläche und dem Dach von den gleichen Voraussetzungen aus. In der Freifläche sind PV-Anlagen im Durchschnitt effektiver, da sie meist optimal ausgerichtet werden können und es mehr Spielraum gibt. Daher wäre eine genauere Auseinandersetzung mit dieser Frage eine Weiterführung dieser Arbeit, um diesen technischen und rein quantitativen Aspekt genauer ausführen zu können und auch ortsspezifisch bewerten zu können. So kann jede Planung weiter detailliert und effektiviert werden.

Eine weitere Fragestellung, die im Zusammenhang mit Photovoltaik im Raum steht, ist die Frage der Speicherung der elektrischen Energie. Denn nicht immer, wenn die Sonne scheint, wird die Energie auch gebraucht. So kann sich der generelle EPBT der Anlagentypen stark verändern, wenn nicht nur die Aufbauten, sondern auch die Speicher des elektrischen Stroms der PV- Anlagen hinzugezogen werden. Dies muss ebenfalls in Zusammenhang mit dem Raum und der örtlichen Gegebenheiten im Raum betrachtet werden. PV-Anlagen können auch in Zusammenhang mit anderen Produzenten elektrischer Energie eingesetzt werden.

Außerdem kann in weiteren Schritten der Wirkungsgrad der PV-Analysen in die Fragestellungen dieser Arbeit eingebracht werden. Sowohl für den GWP wie für die EPBT als

auch für die GIS- Analyse kann der Wirkungsgrad verschiedener Module und Modultypen die Ergebnisse beeinflussen und räumliche Veränderungen nach sich ziehen. Die Paneele werden in dieser Arbeit nicht behandelt, spielen in einem Planungskontext aber eine relevante Rolle, da sie für den Ort und die Gegebenheiten genauso sorgfältig ausgesucht werden müssen wie die Aufständigung der PV-Anlagen.

Die Arbeit und die Hypothese konzentriert sich rein auf die Aufbauten der PV-Anlagen und deren räumliche Aspekte und zieht dort eine genaue Grenze. Das PV-Thema und dessen Ausbau ist vielseitig und es können viele quantitative und qualitative Aspekte inkludiert werden, die standortabhängig sind. Diese Arbeit bildet nur einen Teil der PV-Debatte ab und ist auch als so einer zu sehen. Es kann die Methodik demnach als Unterstützung herangezogen werden und vor allem die Lebenszyklusanalyse in einem globalen Kontext eingesetzt werden, aber nur, wenn die Problemstellung auch in einem räumlichen Zusammenhang eingebettet wird, um die Planung nachhaltig zu gestalten.

6 Quellenverzeichnis

6.1 Literaturverzeichnis

- Abart- Heriszt L., Erker S., Reichel S., Schöndorfer H., Weinke E., Lang S. (2022a): Energiemosaik Austria: Ergebnisse In Kürze / In Bildern / In Zahlen / In Zukunft / Im Vergleich / In Karten. <https://www.energiemosaik.at/portfolios/60101> (3.5.2022)
- Abart- Heriszt L., Erker S., Reichel S., Schöndorfer H., Weinke E., Lang S.(2022b): Energiemosaik Austria: Ergebnisse Portfolio für die Gemeinde Thannhausen. <https://www.energiemosaik.at/portfolios/60101> (3.5.2022)
- Abart- Heriszt L., Erker S., Reichel S., Schöndorfer H., Weinke E., Lang S.: Energiemosaik Austria (2022c): Portfolio für die Gemeinde Weiz. <https://www.energiemosaik.at/portfolios/60101> (3.5.2022)
- Abart-Heriszt L. 2021: Das Energiemosaik Austria: Eine kommunale Energie- und Treibhausgasdatenbank für Österreich. https://boku.ac.at/fileadmin/data/themen/BOKU_Energiecluster/Energiecluster/01-07_EC-FS_Energiemos.pdf (3.5.2022)
- Abart-Heriszt, L., Erker, S.; Stoeglehner, G. (2019). The energy mosaic Austria—a nationwide energy and greenhouse gas inventory on municipal level as action field of integrated spatial and energy planning. In *Energies* 12 (16) 3065. DOI: 10.3390/en12163065
- Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.) (1998): Methoden und Instrumente räumlicher Planung: Handbuch. Verlag der ARL. Hannover: 354 S.
- al Turki, F. A., Meteb, M., & Shammari, A. (2021). Predicting the Output Power of a Photovoltaic Module Using an Optimized Offline Cascade-Forward Neural Network-Based on Genetic Algorithm Model. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 2021 (6): 1-20 DOI: 10.1007/s40866-021-00113-y/Published
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hrsg.) (2021): Leitfaden zur Standortplanung und Standortprüfung für PV- Freiflächenanlagen: Prüfliste 2020. https://www.verwaltung.steiermark.at/cms/dokumente/11682131_79305527/5dd8d465/PV_Pr%C3%BClisten_%C3%9Cberarbeitung_Letztversion_12042021.pdf (23.2.2022)
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (s.a.): Raumplanung: Örtliche Raumplanung. <https://www.verwaltung.steiermark.at/cms/beitrag/11682124/74835415/> (19.2.2022)

- Baumann, M., Dolna-Gruber, C., Dolna-Gruber, C., Goritschnig, W., Pauritsch, G., Rohrer, M. (Hrsg.) (2021): Klima- und Energiestrategie der Länder: Energie, Treibhausgasemissionen und die Kongruenz von Länder- und Bundeszielen. IG Windkraft Österreich. Wien: 153 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hg.) (2014): Praxis-Leitfaden für die ökologische Gestaltung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Unter Mitarbeit von Heidemarie Niedermeir-Stürzer, Simone Klett, Helmut Wartner, Marion Linke, Ruth Dries und Jörg Ermisch. Augsburg (31.03.2020)
- Bemmann U. (2021): Bifaziale Module: beidseitig PV-aktive Solarmodule. <https://solarenergie.de/solarmodule/arten/bifaziale-module> (9.9.2022)
- Biermayr P., Dißauer C., Eberl M., Enigl M., Fechner H., Fürnsinn B., Jaksch-Fliegenschnee M., Leonhartsberger K., Moidl S., Prem E., Schmidl C., Strasser C., Weiss W. Wittmann M., Wonisch P., Wopienka E. (2020): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2019 Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Bundesministerium Klimaschutz, Umweltschutz, Umweltschutz, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien: 232
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich: Periode 2021- 2030. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Wien: 272 S.
- Deboutte G. (2020). Photovoltaik-Freiflächenanlage in Frankreich entsteht auf rauen Holzstrukturen. PV- Magazin Frankreich. <https://www.pv-magazine.de/2020/11/17/photovoltaik-freiflaechenanlage-in-frankreich-entsteht-auf-rauen-holzstrukturen/> (24.10.2022)
- Demuth, B., Maack, A. (2019): Photovoltaik-Freiflächenanlagen Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz. Ein Handbuch für Kommunen, Regionen, Klimaschutzbeauftragte, Energie-, Stadt- und Landschaftsplanungsbüros. https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/planung/landschaftsplanung/Dokumente/E-Kon_Heft6.pdf (18.02.2021)
- Die neue Volkspartei; Die Grünen –Die Grüne Alternative (2020): Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020 -2024.
- Doormann G. (2022): Monokristalline Solarzellen: leistungsstarke Module. <https://www.solaranlagen-portal.com/solarmodule/systeme/monokristallin> (21.4.2022)

- E-CONTROL (2017): Betriebsstatistik 2016. Jahrerzeugung nach Komponenten. Gesamte Versorgung Kalenderjahr 2016. Datenstand: Oktober 2017. Wien. <https://www.e-control.at/statistik/strom/betriebsstatistik/betriebsstatistik2016>. (3.10.2022)
- Ekoé a Akata, M. A., Njomo, D., & Mempoúo, B. (2015). The effect of building integrated photovoltaic system (Bipvs) on indoor air temperatures and humidity (lath) in the tropical region of Cameroon. *Future Cities and Environment* 2015 1(1). DOI: 10.1186/s40984-015-0002-y
- European Commission (2011). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Energy Roadmap 2050, (COM/2011/0885 final)
- Fechner H. (2020): Ermittlung des Flächenpotentials für den Photovoltaik-Ausbau in Österreich: Welche Flächenkategorien sind für die Erschließung von besonderer Bedeutung, um das Ökostromziel realisieren zu können. mit Fokus auf bis 2030 realisierbare PV-Potentiale im Gebäudesektor und technische Potentiale auf anderen Flächen. Studie im Auftrag von Österreichs Energie. Wien: 63 S.
- Federal Ministry Republic Austria (2021): Photovoltaics in the energy system of tomorrow: Research and technological development in Austria. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/eia/eia_213_en.pdf (6.10.2021)
- Florit C., Denz P. (o.j.): Baubook: eco2soft Ökobilanz für Gebäude. https://www.baubook.at/m/PHP/Fragezeichen.php?S_oez_Typ=4&SW=27&LU=1823786253&qj=10&LP=RlkH5&SG_open=16142 (12.9.2022)
- Fraunhofer ISE (2022): Agri- Photovoltaik: Agri- PV. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/agri-photovoltaik-agri-pv.html> (15.20.2022)
- Fritz (2012): Ökobilanzen verschiedener Photovoltaikanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Energiebilanzen. Diplomarbeit. Universität Wien. Wien: 199 S.
- Fthenakis et al., (2011): Fthenakis V., Kim H.C., Frischknecht R., Raugei M., Sinha P., Stucki M.: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, IEA PVPS Task 12, Subtask 20, LCA Report IEA-PVPS T12-02:2011, October 2011, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program.
- Gangwar, P., Tripathi, R. P., Singh, A. K. (2021). Solar photovoltaic tree: a review of designs, performance, applications, and challenges. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1-29. DOI: 10.1080/15567036.2021.1901802

- Gemeinde Thannhausen (o. j.): Gemeinde: Zahlen/ Fakten.
<https://www.thannhausen.at/gemeinde/zahlen/fakten> (3.5.2022)
- Georgitsioti, T., Pearsall, N., Forbes, I., & Pillai, G. (2019). A combined model for PV system lifetime energy prediction and annual energy assessment. *Solar Energy*, 183, 738–744.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.055>
- Gießler H., Fasching K., Jilek W., Koberg G., Redik M., Schubert M. (Hrsg.) (2011): Photovoltaik Freiflächenanlagen- Leitfaden für Raumplanungsverfahren. Langfassung. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz: 54 S.
- Gössinger- Wieser A., Thyr D. (Hrsg.) (2019): Klima- und Energiestrategie Steiermark 2030: AKTIONSPLAN 2019-2021. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz: 140 S.
- Groenewolt, A., Bakker, J., Hofer, J., Nagy, Z., & Schlüter, A. (2016). Methods for modelling and analysis of bendable photovoltaic modules on irregularly curved surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2015 (3), 261–271.
 DOI: 10.1007/s40095-016-0215-3
- Gruber, M., Kanonier, A., Pohn- Weidinger, A., Schindelegger, A. (Hrsg.) (2018): Raumordnung in Österreich und Bezüge zur Raumentwicklung und Regionalpolitik. Geschäftsstelle der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK). Wien: 172 S.
- Hannen P. (2022): Forscher: Vertikal installierte bifaziale Solarmodule in Ost- West- Ausrichtung verringern den Speicherbedarf. <https://www.pv-magazine.de/2022/07/20/forscher-vertikal-installierte-bifaziale-solarmodule-in-ost-west-ausrichtung-verringern-den-speicherbedarf/> (10.10.2022)
- Hess T. (2019): Streifenfundament: Frostfreie Gründung fürs Eigenheim. <https://www.haus.de/bauen/streifenfundament-ratgeber-28312> (19.5.2022)
- Kalogirou, S. A. (2009). Photovoltaic Systems. *Solar Energy Engineering*, 469–519. DOI: 10.1016/B978-0-12-374501-9.00009-1
- Kelm, T., Dasenbrock, J., Günnewig, D., Sporer, K., Schmidt, M., Taumann, M. et al. (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben IIc Solare Strahlungsenergie. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/sites/default/files/zwischenbericht-vorhaben-2c.pdf>, (18.02.2021)
- Koscher R. (2021): Photovoltaik- Freiflächenanlagen in der Raumplanung: Steuerungsansätze zwischen Energiewende und nachhaltiger Raumentwicklung. Masterarbeit. Technische Universität Wien. Wien: 158 S.

- Kranzl S., (2018): Treibhausgasemissionen von Strom: Empfehlungen zur Öko- Bilanzierung. Perspektiven für Umwelt und Gesellschaft. Umweltbundesamt. Wien: 42 S.
- Land Steiermark (2022): Katalog Solardachkataster: Potenzialflächen Photovoltaikanlagen-Steiermark. <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/171c0f69-3ee0-46a7-acf0-e64cb51ceeb8> (5.6.2022)
- Lecturer, S. (2016). Optimization of Electrical Energy Generation for Low Rise Office Building with Folding-BIPV Concept. *Journal of Engineering Technology* 2016 (4): 110-117 DOI:10.5176/2251-3701_4.1.181
- Liu, X., & Wu, Y. (2022). A review of advanced architectural glazing technologies for solar energy conversion and intelligent daylighting control. *Architectural Intelligence* 2022 1(10). DOI: 10.1007/s44223-022-00009-6
- Mikovits, C., Schauppenlehner, T., Scherhauser, P., Schmidt, J., Schmalzl, L., Dworzak, V., Hampl, N., & Sposato, R. G. (Hrsg.) (2021). A spatially highly resolved ground mounted and rooftop potential analysis for photovoltaics in Austria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6). DOI: 10.3390/IJGI10060418
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV NRW) (Hg.) (2014): Photovoltaikanlagen auf Deponien –technische und rechtliche Grundlagen. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.umwelt.nrw.de/extern/e-paper/2014/photovoltaikanlagen_auf_deponien/pubData/source/Broschre_PV_Deponien_endg.pdf, (18.02.2021)
- MKULNV NRW (2014): Photovoltaikanlagen auf Deponien: technische und rechtliche Grundlagen. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: 24 S.
- Nieuwlaar E., Alsema E. (1997): Energy Pay-Back Time (EPBT) and CO₂ mitigation potential. <http://www.ecotopia.com/apollo2/pvepbtne.htm#:~:text=The%20Energy%20Pay%20Back%20Time,energy%20savings%20due%20to%20electricity> (30.12.2022)
- ÖKOBÜRO (2021): UVP- Pflicht für Photovoltaik- Freiflächenanlagen: Position ÖKOBÜRO. https://www.oekobuero.at/files/582/positionspapier_pv-schwellenwerte_05-2021_final (20.12.2021)
- Pearsall, N. M. (2017): Introduction to photovoltaic system performance. In *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*. Elsevier Inc. Newcastle: 1-19 S.

- Photovoltaic Austria (o.J.): Erneuerbaren- Ausbau- Gesetz: Förderungen. <https://pvaustria.at/news/eag-forderungen/> (16.21.2021)
- Pv-mounting (o.j.): Einstellbare Basis Solar Panel Montage Bodenmontage System / Hochwertige Aluminium Verstellbare Solar Panel Bracket. <http://de.pv-mounting.com/roof-mounting-system/flat-roof-mounting-system/adjustable-tilt-system.html> (19.5.2022)
- Rahman M.M., Salehin S., Ahmed S.S.U., Sadrul Islam A.K.M. (2017). Environmental Impact Assessment of Different Renewable Energy Resources: A Recent Development. In Clean Energy for Sustainable Development. Academic Press. Australia: 29-71 S.
- Raugei, M., Sgouridis, S., Murphy, D., Fthenakis, V., Frischknecht, R., Breyer, C., Bardi, U., Barnhart, C., Buckley, A., Carbajales-Dale, M., Csala, D., de Wild-Scholten, M., Heath, G., Jæger-Waldau, A., Jones, C., Keller, A., Leccisi, E., Mancarella, P., Pearsall, N., ... Stolz, P. (2017). Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response. *Energy Policy*, 102, 377–384. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.12.042
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W. P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. In *Environment International* 30 (5): 701–720. DOI: 10.1016/j.envint.2003.11.005
- Sattler S., Zluwa I.; Österreicher D. (2020). The “PV rooftop garden”: Providing recreational green roofs and renewable energy as a multifunctional system within one surface area. *Applied Sciences* 10(5): 1791- 1819. DOI: 10.3390/app1005179
- SEK 1.0 Stadtentwicklungskonzept der Stadt Weiz- Verordnung und Erläuterungsbericht, GZ 15ÖR017/ 2016- 127.
- Sherwani, A. F., Usmani, J. A., Varun. (2010). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (1): 540- 544. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.003
- Späth, L. (2018). Large-scale photovoltaics? Yes please, but not like this! Insights on different perspectives underlying the trade-off between land use and renewable electricity development. *Energy Policy*, 122, 429–437. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.07.029
- Spinnanker GmbH (2022): Spinnanker Betonlose Fundamenttechnik: Funktion. <http://www.spinnanker.com/de/?produkt> (19.5.2022)

- Stadt Wien (2021): Solarleitfaden: Leitfaden für Solaranlagen in Kombination mit Bauwerksbegrünung. Energieraumplanung. Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 20. Wien: 131 S.
- Stadtgemeinde Weiz (2022): Weiz: Stadt zum Leben. <https://www.weiz.at/> (3.5.2022)
- Stahlpreise.eu (2022): Aktuelle Stahlpreise pro Tonne (1.000kg). <https://www.stahlpreise.eu/2022/05/aktuelle-stahlpreise-euro-je-tonne-1000-kg-mai-2022.html> (18.5.2022)
- Statistik Austria (2020): Standard-Dokumentation Metainformationen: Definitionen, Erläuterungen, Methoden, Qualität zur Nutzenergieanalyse. Bundesanstalt Statistik Österreich. Wien: 22 S.
- Stoeglehner G., Baaske W., Mitter H., Niemetz N., Kettl K., Weiss M., Lancaster B., Neugebauer G. (Hrsg.) (2014): Sustainability appraisal of residential energy demand and supply: a life cycle approach including heating, electricity, embodied energy and mobility: *Energy, Sustainability and Society*, 4:24, 1-13. S.
- Stoeglehner G., Narodoslowsky M. (2008): Implementing ecological footprinting in decision-making processes. *Land Use Policy* 25 (3): 321- 431. DOI: 10.1016/j.landusepol.2007.10.002
- Stoeglehner, G. (2020). Integrated spatial and energy planning: a means to reach sustainable development goals. *Evolutionary and Institutional Economics Review* 17 (2), 473–486. DOI: 10.1007/s40844-020-00160-7
- Susan, S., & Antaryama, Ir. I. G. N. (2015). Optimization of Energy Efficiency by Integrated Design of Folding Wall-BIPV and Users Behaviour in Office Building at Surabaya. *GSTF Journal of Engineering Technology*, 2015 3(2). 39-41 DOI: 10.5176/2251-3701_3.2.124
- Trommsdorff M., Gruber S., Keinath T., Hopf M., Hermann C., Schönberger F., Högy P., Zikeli S., Ehmann A., Weselek A., Bodmer U., Rösch C., Ketzler D., Weinberger N., Schindele S., Vollprecht J. (Hrsg.) (2020): Agri- Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg: 56 S.
- Varun, Bhat, I. K., & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (5): 1067–1073. DOI: 10.1016/j.rser.2008.08.004

Wesselak, V., & Voswinckel, S. (2012): Photovoltaik: Wie Sonne zu Strom wird. Springer. Berlin Heidelberg. 133 S.

Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., & Fischer, J. (2017): Handbuch Regenerative Energietechnik. Springer Vieweg. Berlin Heidelberg: 931 S.

6.2 Rechtsquellen

EAG – Erneuerbares- Ausbau- Gesetz, BGBl. Nr. 150/2021 idF BGBl. Nr. 181/2021.

EAG - Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz, StF: BGBl. I Nr. 110/2010 idFBGBl. I Nr.17/2021

UVP- Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz, BGBl. Nr. 697/1993 idF BGBl. I Nr. 80/2018

EIWOG- Steiermärkisches Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz, LGBl. Nr. 70/2005 idF LGBl. Nr. 59/2020

StNSchG- Steiermärkisches Naturschutzgesetz, LGBl. Nr. 71/2017 idF LGBl. Nr. 87/2019

Stmk. BauG- Steiermärkisches Baugesetz, LGBl. Nr. 59/ 1995 idF LGBl. Nr. 91/2021

StROG- Steiermärkisches Raumordnungsgesetz 2010, LGBl. Nr. 49/2010 idF LGBl. Nr. 15/2022

Statistik Austria (Hrsg.) (2020): Nutzenergieanalyse für die Steiermark 1993- 2019.
<https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse>
(aufgerufen am 27.9.2022)

7 Anhang

| Gebäudegebundene PV-Anlagen | Materialität und Bauteile mit Maßen | Menge der Materialien und Anzahl der PV-Panäle pro Unterkonstruktion (Standardpaneelgröße: 170x100x4cm) |
|---------------------------------------|--|--|
| <u>Dachhaken</u> | Dachhaken aus 2 Teilen verzinktem Stahl: <ul style="list-style-type: none"> • Länge 42cm Höhe 0,25cm Breite 3cm • Länge 14cm Höhe 0,4cm Breite 10cm 8 Bauschrauben | 1 Panel: <ul style="list-style-type: none"> • 3,5 Dachhaken |
| <u>Dachhaken mit Profil</u> | Dachhaken Montageschiene aus Aluminium: <ul style="list-style-type: none"> • Breite 4cm Höhe 4cm Länge 200cm Dicke 0,25cm 2 Bauschrauben Modulklemme aus verzinktem Stahl: <ul style="list-style-type: none"> • 1x Bauschrauben • Länge 12cm • Breite 3cm • Höhe 0,4cm | 1 Panel: <ul style="list-style-type: none"> • 2 Dachhaken • 1 Aluminium-Profil • 3 Modulklemmen |
| <u>Winkelverstellbares Basismodul</u> | Winkelverstellbare Dreiecksstütze aus verzinktem Stahl: <ul style="list-style-type: none"> • L-Träger 109cm • L-Träger 54,5cm • 3-mal Schraube | 1 Panel: <ul style="list-style-type: none"> • 2 Dreiecksstütze für |

| | | |
|---|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • L-Träger Abmessung 3cmx3cm • Materialdicke 2,5mm <p>Modulklemme</p> <ul style="list-style-type: none"> • | <p>Flachdachsolar-modul</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 Modulklemmen |
| <p><u>Winkelverstellbares Basismodul mit Betonbeschwerungsfuß</u></p> | <p>Montageschiene Aluminium Profil 3m + 4 Schrauben</p> <p>Haken zur Aluminiumprofilbefestigung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 8cm • Breite 3cm • Höhe 0,4cm • 2x Bauschrauben <p>Modulklemme</p> <p>Betonbeschwerungsfuß</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länger 150cm • Höhe 10cm • Breite 12cm • 4 Schrauben <p>Große Dreiecksstütze-Aluminium</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 Schraube • 2 Träger Länge 140cm • Breite 3cm • Materialdicke 2,5mm • 1x verstellbarer Träger Länge 95cm | <p>2 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Bodenmontage • 2 Große Dreiecksstütze • 2 Aluminium-Profil 3m • 8 Haken zur Modulklemme • 4 Haken zur Aluminium-Profil Befestigung |
| <p><u>Module mit Ost- West Ausrichtung</u></p> | <p>Doppelte Dreiecksstütze aus verzinktem Stahl:</p> <ul style="list-style-type: none"> • L Träger Länge 290cm • L Träger Länge 90cm • 2 L Träger 180cm • Materialdicke 0,25 cm • 4 Schrauben <p>Montageschiene Aluminium Länge 2m mit 2 Schrauben</p> <p>Modulklemme Mittelklemme</p> <ul style="list-style-type: none"> • | <p>4 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Doppelte Dreiecksstütze • 4 Montageschienen Aluminium 2m • 10 Modulklemme |

Tabelle 9: Gebäudenegebundene PV- Anlagen und ihre Bauteile und Materialien (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)

| Freiflächen PV-Anlagen | Materialität und Bauteile mit Maßen | Menge der Materialien und Anzahl der PV-Panele pro Unterkonstruktion |
|---|---|--|
| <p><u>Module mit Ost-West Ausrichtung in der Freifläche</u></p> | <p>Fundament</p> <p>L- Träger 2,5m - verzinkter Stahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 250cm • Maße 4x4cm • Materialstärke 0,25cm • 1 Schraube <p>L- Träger 1m- verzinkter Stahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 100cm • Maße 4x4cm • Dicke 0,25cm • 1 Schraube <p>L- Träger Stützbalken 3m- verzinkter Stahl</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 300cm • Maße 4x4cm • Materialstärke 0,25cm • 2 Schrauben <p>Stahlquerträger Formrohr 4m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 400cm • Maße 7x7 cm • Dicke 0,25 • 2 Schrauben <p>Montageschiene Aluminiumprofil 2m</p> <p>Modulklemme- Mittelklemme</p> | <p>8 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fundament • 1 L-Träger 2,5m • 2 L-Träger 1m • 2 L-Träger Stützbalken • 2 Stahlverankerung Formrohr 4m • 10 Montageschiene Aluminiumprofil 2m • 10 Modulklemme |
| <p><u>Masthalterung</u></p> | <p>Fundament</p> <p>Mast aus Stahl verzinkt 2m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser 9cm • Dicke 0,3cm • Länge 200cm | <p>6 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Mast 2m |

| | | |
|---|--|---|
| | <p>Bodenplatte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Breite 15cm • Länge 15cm • Höhe 0,5cm <p>Bodenverankerung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser 0,7 cm • Länge 20cm <p>Winkel Träger</p> <ul style="list-style-type: none"> • Breite 6cm • Länge 6cm • Höhe 100cm • Materialdicke 0,4cm • 2x Schraube <p>Stahlquerträger Formrohr 2m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maße 7x7 cm • Wanddicke 0,25 cm • Länge 200cm <p>Stahlstützbalken für Kippung und Ausrichtung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 40cm • Breite 5cm • Dicke 0,5 cm • 2 Schrauben <p>Schiene Stahlquerträger 2m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 200cm • Maße 7x7 cm nach oben offen • Platte zur Befestigung 10x5x0,4 cm • 2x Schrauben <p>Montageschiene Aluminium- Profil (Länge je nach Anzahl der Module) Aluminiumprofil für 6 Panele Länge 300cm Maße 4x4 cm Wanddicke 0,25</p> <p>Modulklemme- Mittelklemme (siehe Winkelverstellbares Basismodul)</p> | <ul style="list-style-type: none"> • 1 Bodenplatte • 4 Bodenverankerung • 1 Unterkonstruktion • 4 Aluminiumprofil 300cm • 24 Haken zur Modulbefestigung auf Aluminiumprofil • 1 Fundament |
| <p><u>Vertikale bifaziale PV-Anlage</u></p> | <p>Fundament</p> <p>Mast 2,5m - U- Profil</p> <ul style="list-style-type: none"> • Breite 15cm • Länge 250cm • Materialstärke 0,25cm <p>Querstange zwischen Masten aus Aluminium</p> | <p>2 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Mast • 2 Querstangen |

| | | |
|---|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Länge 180cm • Durchmesser 4cm • Wanddicke 0,25 <p>Modulklemme für rahmenlose Photovoltaikmodule (Mitte)</p> <p>Material: Aluminium mit EPDM- Profil</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 8cm • Breite 4cm • Höhe 3cm • Schraube • 4 EPDM- Profile <p>Modluklemme für rahmenlose PV-Module (Rand)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 8cm • Breite 3cm • Höhe 3cm • Schraube • 2 EPDM- Profile | <ul style="list-style-type: none"> • 3 Modulklemme Mitte • 6 Modulklemmen • 1 Fundament |
| <p><u>Starre Südausrichtung mit einem Mast</u></p> | <p>Fundament</p> <p>Stahlquerträger Quadrat 3m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maße 7x7cm • Materialdicke 0,25 • Länge 300cm • Schraube <p>Stahlstützbalken</p> <p>Montageschiene Aluminium- Profil 3m</p> <p>Modulklemme- Mittelklemme</p> | <p>6 Panele</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Mast • 2 Fundament • 2 Stahlverankerung-Formrohr 3m • 2 Stahlstützbalken • 4 Montageschiene Aluminium- Profil 3m + 4 Schrauben • 22 Modulklemme-Mittelklemme |
| <p><u>Starre Südausrichtung mit zwei Masten</u></p> | <p>Mast Dünn Formrohr - 0,9m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 90cm • Formrohr 4x4 cm • Dicke 0,25 • Schraube <p>Mast Dünn Formrohr 180cm</p> <p>Stahlstützbalken Dünn (Zylinder)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 300cm | <p>4 Panele</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Fundament • 1 Mast Dünn 90cm • 1 Mast Dünn 180cm • 1 Stahlstützbalken Dünn • 1 Stahlverankerung-Formrohr (Quadrat) 3m |

| | | |
|--|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser 1 cm • 2x Schraube <p>Montageschiene Aluminiumprofil 3m + 2 Schrauben</p> <p>Modulklemme- Mittelklemme</p> | <ul style="list-style-type: none"> • 4 Montageschiene Aluminium- Profil 3m + 2 Schrauben • 22 Modulklemme- Mittelklemme |
| <p><u>Starre Südausrichtung mit Holz Unterkonstruktion</u></p> | <p>Stahl-Fuß für Holzkonstruktion</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maße 10x30x0,25cm Blech • Durchmesser 1cm • Länge 20cm Zylinder <p>Holztragpfosten 90cm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 90cm • Maße 9x9 cm • 4 Schrauben <p>Holztragpfosten 180cm</p> <p>Holzstützbalken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 70 cm • Maße 10x2,3 cm • 4x Schrauben <p>Holzquerträger 3m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 300cm • Maße 10x10 cm <p>Montageholz für PV- Module</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 300cm • Maße: 3x4 cm • 2 Schrauben | <p>6 Paneele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Fundament + Stahl-Fuß und Schrauben • 1 Holztragpfosten 90cm • 1 Holztagpfosten 180cm • 6 Holzstützbalken • 2 Holzquerträger • 6 Montagehölzer für PV- Paneele • 24 Modulklemme- Mittelklemme |

| | Modulklemme- Mittelklemme | |
|--|---|--|
| <u>PV-Module auf zweiter Ebene</u> | <p>Fundament</p> <p>Stützen Formrohr 12x12x500cm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materialdicke: 0,25cm <p>Fachwerkträger 7m</p> <p>Querträger 7m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formrohr 5x10x700cm • Materialdicke 0,25cm <p>Stahl Sparren 2,4m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Formrohr 3x4x240cm • Materialdicke 0,25cm <p>Haken zur Modulbefestigung</p> <p>Montageschiene 7m</p> | <p>72 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 Stützen • 3 Fachwerkträger • 6 Querträger • 21 Stahl Sparren • 180 Haken zur Modulbefestigung • 6 Montageschiene 7m |
| <u>Parkplatzüberdachung aus Stahl für 1 Auto</u> | <p>Fundament</p> <p>Stahltragpfosten 2,3m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material: verzinkter Stahl • Länge 230cm • Maße 7x7 cm • Materialstärke: 0,25 cm <p>Stahlquerträger 6m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 600cm • Maße 7x7 cm • Materialstärke 0,25 cm <p>Stahlsparren 5,6 m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Länge 560cm • Maße 3,5x7 cm | <p>12 Panele:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4x Stahltragpfosten 2,3m • 2x Stahlquerträger 6m • 6x Stahlsparren 5,6 m |

| | | |
|---|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Materialstärke 0,25 cm | |
| <u>Parkplatzüberdachung</u> <u>aus Holz für 1 Auto</u> | Fundament Holztragpfosten 2,3m <ul style="list-style-type: none"> • Material: Holz (Lärche) • Länge 230 • Maße 12x 12 cm Holzquerträger 6m <ul style="list-style-type: none"> • Länge 300cm • Maße 10x10 cm Holzsparren 5,6m <ul style="list-style-type: none"> • Länge 560cm • Maße 8x4 cm Holzstützbalken Schrauben | 12 Panele: <ul style="list-style-type: none"> • 4 Fundament • 8x Holztragpfosten 2,3m • 3x Holzquerträger 6m • 6x Holzsparren 5,6m • 12x Holzstützbalken • 60x Schrauben |

Tabelle 10: Freiflächen PV- Anlagen und ihre Bauteile und Materialien (Quelle: eigene Bearbeitung 2022)

| Bauteil | GWP- total (kg CO2 equ. Pro m² BZFOI) | PENR Tot (kWh) |
|--|---------------------------------------|----------------|
| Betonbeschwerungsfuß | 5 | 9 |
| Bodenplatte +Bodenverankerung | 12 | 47 |
| Dachhaken | 9 | 34 |
| Dachhaken- Montageschiene (2m) | 50 | 182 |
| Doppelte Dreieckstütze | 73 | 300 |
| Fachwerkträger 7m | 1116 | 4566 |
| Groß Dreieckstütze | 38 | 137 |
| Haken zur Aluminiumprofilbefestigung | 1 | 3 |
| Haken zur PV-Modulbefestigung (MODULKLEMME-MITTELKLEMME) | 1 | 4 |
| Holzpfosten 180cm | -10 | 18 |
| Holzpfosten 90cm | -5 | 9 |

| | | |
|--|-----|------|
| Holzquerträger 6m | -42 | 74 |
| Holzsparren 5,6m | -12 | 22 |
| Holzstützbalken | -1 | 3 |
| Holztragpfosten 2,3m | -23 | 40 |
| L- Träger Stützbalken 3m | 30 | 122 |
| L-Träger 1m | 10 | 41 |
| L-Träger 2,5m | 25 | 101 |
| Mast 2,5m - U- Profil | 62 | 253 |
| Mast 2m - Rohr | 108 | 444 |
| Mast Dünn 0,9m | 22 | 91 |
| Mast Dünn 1,8m | 45 | 182 |
| Mast Formrohr 5m | 388 | 1588 |
| Modulklemme für rahmenlose PV- Module (Mitte) | 2 | 8 |
| Modulklemme für rahmenlose PV- Module (Rand) | 2 | 6 |
| Montageholz für PV- Modul | -2 | 3 |
| Montageschiene Alu- Profil 3m | 75 | 273 |
| Montageschiene Alu- Profil 3m, 4 Schrauben | 75 | 273 |
| Querstangen zwischen Masten | 45 | 164 |
| Querträger 7m | 336 | 1373 |
| Schiene Stahlquerträger 2m | 71 | 290 |
| Stahl Sparren 2,4m | 52 | 211 |
| Stahlfuß für Holzkonstruktion | 6 | 25 |
| Stahlquerträger Formrohr 2m | 89 | 364 |
| Stahlquerträger Formrohr 4m | 179 | 732 |
| Stahlquerträger Formrohr 3m | 134 | 548 |

| | | |
|--|-----|------|
| Stahlquerträger Formrohr 6m | 268 | 1096 |
| Stahlsparren 5,6m | 185 | 756 |
| Stahlstützbalken dünn | 16 | 64 |
| Stahlstützbalken für Kippung und Ausrichtung | 7 | 27 |
| Stahltragpfosten Formrohr 7x7x230cm | 118 | 419 |
| Verbindungsstück Holzbalken | 2 | 7 |
| Winkel Träger | 59 | 243 |
| Winkelverstellbares Basismodul (Dreieckstütze) | 27 | 111 |
| Montageschne 7m | 176 | 637 |

Tabelle 11: Bauteile der PV-Unterkonstruktionen und deren GWP und PENR Tot (Quelle: eigene Berechnung, 2022)

| | GWP- total (kg CO2 equ. Pro m² BZFOI) pro PV- Modul | PENR (kWh) pro Modul |
|---|---|-----------------------------|
| Dachhaken | 27 | 102 |
| Dachhaken mit Profil | 71 | 262 |
| Winkelverstellbares Basismodul | 58 | 238 |
| Winkelverstellbares Basismodul mit Bodenmontagesystem | 83 | 291 |
| Aufdach- Modul mit Ost- West- Ausrichtung | 71 | 267 |
| Freifläche- Modul mit Ost- West- Ausrichtung | 131 | 487 |
| Masthalterung | 120 | 442 |
| Senkrechte PV- Anlagen | 85 | 321 |
| Starre Südausrichtung mit einem Mast | 137 | 488 |
| Starre Südausrichtung mit zwei Masten | 102 | 335 |

| | | |
|--|-----|-----|
| Starre Südausrichtung mit Holz Unterkonstruktion | 2 | 75 |
| PV- Module auf zweiter Ebene | 125 | 497 |
| Stahlgerüst- Parkplatzüberdachung für zwei Autos | 192 | 716 |
| Holzgerüst- Parkplatzüberdachung für zwei Autos | 3 | 107 |

Tabelle 12: GWP in kg CO₂ equ. Pro m² BZF₀₁ und PENR in kWh der PV-Unterkonstruktionen auf dem Dach und in der Freifläche für ein PV- Modul (Quelle: eigene Berechnung 2022)

| Fundamente | GWP- total (kg CO ₂ equ. Pro m ² BZF ₀₁) |
|----------------------------|--|
| Betonfuß | 5 |
| Rammprofil | 32 |
| Schraubenanker | 166 |
| Punktfundament 30x30x80cm | 122 |
| Punktfundament 40x40x80cm | 199 |
| Streifenfundament | 466 |
| Spinnanker mit 6 Gewinden | 47 |
| Spinnanker mit 12 Gewinden | 48 |

Tabelle 13: EPBT der Fundamente der PV-Unterkonstruktionen (Quelle: eigene Berechnung 2022)

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Leo Müller
Wien 25. 01. 2023