



UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN

# Auswirkungen der Solarthermieanlage Friesach auf das Mikroklima

verfasst von

Sophie SCHIEFER, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Umwelt- und Bioressourcenmanagement

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Wien, Dezember 2022

Betreut von:

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Philipp Weihs

Institut für Meteorologie und Klimatologie

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt

# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Sophie Schuster

Wien, 10.12.2022

# Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei allen bedanken, die mich während der Masterarbeit unterstützt haben.

Zuallererst danke ich meinen Eltern von ganzem Herzen, die mir mein Studium ermöglichten, mich immer unterstützen und hinter mir stehen. Und auch an die, die mir immer zuhören, mich aufbauen, mit mir lachen... Mama, Papa, Gerhard, Stefan und Miriam-Danke, dass ihr da seid!

Danke auch an meinen Betreuer für die Hilfestellungen und die Unterstützung, und an die weiteren Kräfte, die die Sensoren am Feld installiert haben und dafür den langen Weg von Wien auf sich genommen haben.

Ebenso gilt mein Dank meinen Kollegen der Kelag Energie & Wärme, die mir vor allem beim Programmieren in R sehr geholfen haben. Ohne euch wären die Abbildungen nicht so schön wie sie jetzt sind. Die Unterstützung, das nette Arbeitsklima und die Gespräche weiß ich sehr zu schätzen.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
Abstract .....	8
1. Einleitung.....	9
2. Theoretischer Teil .....	11
2.1. Erneuerbare Energien.....	11
2.2. Österreich .....	12
2.3. Europa .....	14
2.4. Preisentwicklung fossiler Energieträger und Solaranlagen .....	14
2.5. Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	16
2.6. Solarthermie .....	17
2.6.1. Solarthermie in Österreich.....	18
2.6.2. Solarthermie Weltweit .....	19
2.6.3. Funktionsweise .....	21
2.6.4. Umweltauswirkungen .....	24
2.7. PVT – Photovoltaisch-Thermische Systeme .....	25
2.8. Photovoltaik in Österreich .....	26
2.8.1. Photovoltaik Weltweit .....	27
2.8.2. Agri-PV.....	28
2.8.3. Umweltauswirkung .....	31
3. Problemstellung .....	37
4. Methodischer Teil.....	38
4.1. Projektbeschreibung Solarthermieanlage Friesach.....	40
4.1.1. Beschreibung des Klimas.....	40
4.1.2. Anlagenbeschreibung.....	43
4.1.3. Beweidung der Fläche.....	44
5. Ergebnisse.....	46
5.1. Messergebnisse der Freifläche .....	46
5.1.1. Lufttemperatur .....	46
5.1.2. Luftfeuchtigkeit .....	49
5.1.3. Wind.....	50
5.1.4. Globalstrahlung .....	53
5.1.5. Bodentemperatur .....	55
5.1.6. Bodenfeuchtigkeit.....	58
5.1.7. Optische Begutachtung .....	60
6. Diskussion und Ausblick .....	61
Literaturverzeichnis.....	65

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bruttoinlandsverbrauch Österreich 2019 (BMNT, 2020).	13
Abb. 2: Erneuerbare Energien 2019 (BMNT, 2020).	13
Abb. 3: Strom-, Gas- und CO2 Preise (Dolna-Gruber et al., 2022).	15
Abb. 4: Preis- und Mengenentwicklung PV-Module in Deutschland (Wesselak et al., 2017).	15
Abb. 5: Vergleich Stromerzeugungskosten in der EU (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).	16
Abb. 6: In Betrieb befindliche thermische Kollektoren in Österreich von 1996-2020 (Biermayr et al., 2021).	19
Abb. 7: Thermische Solaranlagen in den EU-Mitgliedsstaaten (Biermayr et al., 2020).	20
Abb. 8: Einteilung Solarthermische Kollektoren nach Evangelisti et al., 2019.	22
Tab. 1: Einteilung thermische Kollektoren (Kaltschmitt et al., 2020).	23
Abb. 9: Solarzellenarten in Österreich von 2010 bis 2020 (Biermayr et al., 2021).	27
Abb. 10: Agri-Photovoltaik mit bodenmontierten Solarpaneelen (Dinesh und Pearce, 2015).	29
Abb. 11: PV-Module auf Stelzen (Dinesh und Pearce, 2015).	30
Abb. 12: Effizienz der Flächennutzung auf 2ha Ackerland (Fechner et al., 2018).	30
Abb. 13: Eignung von Kulturarten unter PV-Modulen (Oberfell, 2017 zit. n. Fechner et al., 2018).	31
Tab. 2: Gumpensteiner Photovoltaikmischung Universal (Krautzer, 2021).	33
Abb. 14: Messpunkte Solarthermieanlage.	39
Abb. 15: Solarthermieanlage Friesach (Eigenes Bild).	40
Abb. 16: Mittelwerte der Globalstrahlung ( $J/cm^2$ ) in Friesach 2008 bis 2021 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).	42
Abb?: Temperaturmittelwerte in Friesach 1959 bis 2021 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).	42
Abb. 17: Temperaturentwicklung 1959-2021 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).	42
Abb. 18: Sonnenstunden gesamt 1961-2020 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).	43
Abb. 19 und 20: Beweidung Solarthermieanlage Friesach (Eigene Bilder).	45
Abb. 21: Lufttemperaturverlauf über Vegetationsperiode.	47
Abb. 22: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf bei wolkenlosem Wetter.	48
Abb. 23: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf bei bewölktem Wetter.	48
Abb. 24: Luftfeuchtigkeitsverlauf über Vegetationsperiode.	49
Abb. 25: Windgeschwindigkeit über Vegetationsperiode.	50
Abb. 26: Windrichtung über Vegetationsperiode.	51
Abb. 27: Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Windrichtung.	52
Abb. 28: Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung.	53
Abb. 29: Globalstrahlung Friesach.	54
Abb. 30: Globalstrahlung 29.05.2022.	54
Abb. 31: Globalstrahlung 19.07.2022.	54
Abb. 32: Bodennahe Temperaturveränderung über die Vegetationsperiode 15cm.	56
Abb. 33: Temperaturverlauf über Vegetationsperiode 2cm.	57
Abb. 34: Bodentemperaturverlauf über Vegetationsperiode -10cm.	58
Abb. 35: Bodenfeuchtigkeitsverlauf über Vegetationsperiode.	59
Abb. 37: Bewuchs der Referenzfläche im Juli (Eigene Bilder).	60
Abb. 36: Bewuchs der Solaranlage im Juli (Eigene Bilder).	60

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einteilung thermische Kollektoren (Kaltschmitt et al., 2020). .....	23
Tab. 2: Gumpensteiner Photovoltaikmischung Universal (Krautzer, 2021). .....	33

# Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
GWh/a	Gigawattstunden pro Jahr
J/cm <sup>2</sup>	Joule pro Quadratcentimeter
km <sup>2</sup>	Quadratkilometer
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt-peak
kWth	Kilowatt thermal
m	Meter
mm	Millimeter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MWh	Megawattstunde
TWh	Terawattstunde

## Abstract

Der massive Preisanstieg der fossilen Energien durch Pandemie und Ukrainekrieg sowie das ambitionierte Ziel Österreichs bis 2030 klimaneutral zu werden macht den Ausbau erneuerbarer Energien unerlässlich. Die Solarenergie bzw. -thermie ist eine Form der Verwendung dieser, die, durch den Anstieg der Sonnenstundendauer, auch das Potenzial einer Doppelnutzung mit landwirtschaftlicher Produktion aufweist.

Diese Arbeit dient als erster Schritt mikroklimatische Auswirkungen von Freiflächen-Solarthermieanlagen zu erkennen, um in Folge Maßnahmen ableiten zu können. Die Ergebnisse wurden mit Studien von bereits durchgeführten PV-Freiflächenanlagen hinsichtlich mikroklimatischer Auswirkungen verglichen. In diesem Zusammenhang wurden meteorologische Messungen auf der Freiflächenanlage in Friesach durchgeführt. Dabei wurden die Lufttemperatur und -feuchte, die Bodentemperatur und -feuchte sowie die Globalstrahlung und die Windgeschwindigkeit über die Vegetationsperiode aufgezeichnet. Eine Referenzfläche am Rande der Anlage diente dabei als Vergleich. Die Ergebnisse zeigen, dass mikroklimatische Veränderungen messbar sind. Geringe Unterschiede wurden in der Lufttemperatur- und feuchte zwischen dem Messpunkt im Zentrum und der Referenzfläche gemessen, die statistisch nicht signifikant sind. Die Bodentemperatur wurde in drei verschiedenen Höhen bzw. Tiefen gemessen, die Unterschiede der Messpunkte sind statistisch signifikant. Die bodennahe Lufttemperatur bei +2 cm und die Bodentemperatur bei -10 cm sind im Zentrum kühler als auf der Referenzfläche, mit Ausnahme der Messungen in 15 cm Höhe. Ebenso statistisch signifikant sind die Ergebnisse der Bodenfeuchte.

Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen zur Unterstützung des Managements und der Designoptimierung. Um einer Flächenversiegelung entgegenzuwirken, wird empfohlen Maßnahmen zur Aufwertung der Flächen durchzuführen sowie eine eventuelle Doppelnutzung in Betracht zu ziehen.

# 1. Einleitung

Fossile Brennstoffe sind seit dem Beginn der industriellen Revolution die primäre Energiequelle, um den Energiebedarf der Menschheit zu decken. Probleme hierbei sind nicht nur die weltweite Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, sondern auch negative Umweltauswirkungen. Eine Problematik stellt dabei die Auswirkung auf das Klima dar, da Treibhausgase durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe frei werden (Dwyer et al., 2018). Die Erhöhung dieser Emissionen führt zu einer Steigerung des Treibhauseffekts und damit folgend zu einem Temperaturanstieg auf der Erde (Wesselak et al., 2017). Nach Brauner (2015) ist der Klimawandel der Faktor, um die Energiewende voranzutreiben, mit dem Zwischenziel Treibhausgasemissionen zu senken, vor allem da der Energiesektor mit ca. 50% zu den Treibhausgasemissionen beiträgt. Eine Lösung kann der Ausbau regenerativer Energien sein (Wesselak et al., 2017). In Österreich betrug der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung 2018 rund 77% (BMNT, 2020), dennoch ist ein Ausbau von erneuerbaren Energien in Zukunft notwendig, um die Klimaziele zu erreichen (Biermayr et al., 2021). Die EU hat sich vorgenommen bis 2050 klimaneutraler Kontinent zu sein (Europäische Kommission, s.a.), dabei spielen rechtliche Rahmenbedingungen ebenso eine wichtige Rolle.

Die Solarenergie gehört, neben der Windenergie, zu den erfolgversprechendsten erneuerbaren Energiequellen und hat sich in den letzten Jahren weiterentwickelt. Sie besitzt, neben anderen regenerativen Energien, das größte Potenzial zur Minderung des Klimawandels (Dhar et al., 2019). Positive Aspekte der Solarenergie sind beispielsweise die Reduktion von Treibhausgasen, die Unabhängigkeit von Energie aus dem Ausland, Beschäftigungsaspekte, die Stabilisierung von degradiertem Boden sowie in Entwicklungsländern die Beschleunigung der Elektrifizierung im ländlichen Raum (Hernandez et al., 2014). Die Solarenergie kann mithilfe von Photovoltaik (PV)- als auch von Solarthermieanlagen genutzt werden (Wesselak et al., 2017; Hernandez et al., 2014). Solarthermische Anlagen werden zur Unterstützung der Heizung sowie zur Wassererwärmung verwendet (Watter, 2019), wohingegen Solarzellen die Strahlung direkt in elektrische Energie umwandeln (Blum et al., 2020).

Der zunehmende Energiebedarf der Menschheit und dem Streben diesen durch erneuerbare Ressourcen zu decken, hat als Folge auch zu einem Ausbau von Freiflächen-Solarparks geführt (Armstrong et al., 2016). Das Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz ist in diesem Zusammenhang, vor allem bei Freiflächenanlagen in Österreich, ein wichtiger Aspekt.

Der Ausbau der Freiflächen-Solarparks hat eine Änderung der Landnutzung zur Folge, welche auch Auswirkungen auf das Ökosystem hat (Armstrong et al., 2016). Nach Trommsdorff et al. (2022) hat beispielsweise die Verschattung von PV-Modulen Auswirkungen auf das Mikroklima (Trommsdorff et al., 2022). Die Zunahme von großflächigen Solarparks weltweit und die dazu bis jetzt durchgeführten Studien zeigen, dass es wichtig ist, die Wechselwirkungen zwischen der Solarenergie und der

Umwelt verstehen zu lernen. Vor allem auf regionaler aber auch auf globaler Ebene müssen Umweltveränderungen erkannt werden und wie deren Auswirkungen verringert oder verstärkt werden können (Hernandez et al., 2014). In Hinblick auf die Bewirtschaftung der Fläche unter Solarpaneelen dient Agri-PV als Beispiel für eine Doppelnutzung von Energie und landwirtschaftlichen Produkten. Eine Solar-Freiflächenanlage kann die Bewirtschaftung der Fläche (Dinesh und Pearce, 2015) sowie das Ökosystem beeinflussen (Armstrong et al., 2016).

Um herauszufinden, ob neben PV-Freiflächenanlagen, wie Ergebnisse von Studien zeigen (Armstrong et al., 2016; Makaronidou, 2020), auch eine Solarthermieanlage das Mikroklima beeinflusst, wird in dieser Arbeit mittels meteorologischer Messungen erörtert. Die untersuchte Fläche der Solarthermieanlage befindet sich in Friesach, Kärnten. Dabei werden Parameter wie die Luft- und Bodentemperatur sowie -feuchte, die Windgeschwindigkeit und die Strahlung mithilfe von Sensoren gemessen. Ebenso wird das Pflanzenwachstum und die Pflanzendichte auf der Freiflächenanlage innerhalb der Vegetationsperiode beobachtet. Mit diesen Ergebnissen soll eine zukünftige Beurteilung des Ökosystems einer Solar-Freiflächenanlage ermöglicht werden.

## 2. Theoretischer Teil

Der theoretische Teil beinhaltet eine Literaturstudie, die erneuerbare Energien, Preisentwicklungen, rechtliche Aspekte und Ziele sowie technische Aspekte der Solarthermie und Photovoltaik. Anschließend wird auf Umweltauswirkungen von Solaranlagen eingegangen.

### 2.1. Erneuerbare Energien

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Nutzung von erneuerbaren Energien, die Zusammensetzung des Verbrauchs und der Importe Österreichs sowie der EU angeführt. Ebenso wird aus aktuellem Anlass die Preisentwicklung dargestellt.

Die Nachfrage nach Energie steigt an und es werden im privaten sowie im öffentlichen Sektor übermäßig fossile Brennstoffe verwendet. Durch die wachsende Nachfrage könnte der Ölverbrauch bis 2025 120 Millionen Tonnen pro Tag betragen (Evangelisti et al., 2019). Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen Treibhausgase, Emissionen, wie Lachgas, Stickoxide sowie Kohlenstoffmonoxid und -dioxid, die die Umwelt schädigen (Blum et al., 2020). Das Treibhauspotenzial entspricht der Erwärmungswirkung eines Gases, welche das Gas freigibt, wenn es in die Atmosphäre gelangt. Dabei spielt die Menge des Gases und die Verweildauer in der Atmosphäre für die Treibhauswirkung eine Rolle. Das Treibhauspotenzial wird in Relation zu dem von Kohlenstoff angegeben (Günther, 2015). Neben der Klimaerwärmung ist auch die Verringerung von fossilen Energiereserven, durch deren Nutzung, ein Grund für den Umstieg auf erneuerbare Energieträger (Christian et al., 2016). Die Nutzung von erneuerbaren Energien gilt als nachhaltig und umweltfreundlich, da sie einen weitaus geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hinterlässt im Vergleich zu fossilen Energieträgern (Evangelisti et al., 2019).

§5 Abs 1 Z 13 EAG definiert Energie aus erneuerbaren Quellen oder Energieträgern oder erneuerbare Energie als „Energie aus erneuerbaren, nichtfossilen Energiequellen, das heißt Wind, Sonne (Solarthermie und Photovoltaik), geothermische Energie, Umgebungsenergie, Gezeiten-, Wellen- und sonstige Meeresenergie, Wasserkraft und Energie aus Biomasse, Deponiegas, Klärgas, Biogas und erneuerbarem Gas.“

Die Verbindung von Technologie und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sowie zur Nutzung erneuerbarer Energie ist notwendig, um die Energiewende zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu schaffen und eine langfristige Energieversorgung zu gewährleisten (Christian et al., 2016).

## 2.2. Österreich

Österreich verfügt über Wasserkraft und biogene Brenn- sowie Treibstoffe, die den größten Anteil an erneuerbaren Energien der inländischen Primärproduktion ausmachen. Der Anteil an Wasserkraft ist allerdings leicht sinkend wohingegen der Biomasseanteil steigt. Im EU-Vergleich liegt Österreich beim Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch, der angibt wie viel Strom in einem Land verbraucht wird, mit 73,1% an erster Stelle. Der Anteil am Bruttoendenergieverbrauch liegt bei 33,4% (BMNT, 2020). Definiert wird dieser als Verbrauch von Energie durch diverse Endnutzer mit Netzverlusten und dem Eigenkonsum von Kraftwerken (Fechner et al., 2018).

Der Anstieg des Ölpreises im Jahr 2011 war für die Entwicklung erneuerbarer Energien in Österreich förderlich, allerdings sank dieser im Jahr 2014 wieder ab. Dies verursachte den Anreiz vorhandene Heizöltanks nicht gegen erneuerbare Energien zu wechseln (Biermayr et al., 2020). Dennoch betrug der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung 2018 ca. 77%, Photovoltaikanlagen sind mit 2,2% an der Bruttostromerzeugung beteiligt. Der Einsatz an erneuerbarer Energie ist auch auf Förderanträge zurückzuführen. Beispiele sind die Ökostromförderung, die vervielfacht wurde, ebenso stieg der Anteil des geförderten Ökostroms am Endverbrauch (BMNT, 2020). Als Endverbrauch wird die Menge an Energie verstanden, die den Konsumentinnen zur Verfügung steht (Christian et al., 2016).

Der Energieimport Österreichs 2019 setzte sich wie folgt zusammen: 46,2% Öl, 35,8% Gas, 8,6% Kohle, 6,8% elektrische Energie und 2,7% biogene Energien (BMNT, 2020). Bei den Energieimporten überwiegen fossile Energien. Die Abhängigkeit von Importen ist in Österreich, aufgrund der geringen Vorkommen an fossilen Energieträgern, höher (71,9%) als im europäischen Durchschnitt (55,7%) (BMNT, 2020).

Auch der Bruttoinlandsverbrauch, der die verfügbare Energiemenge zur Deckung des Bedarfs in einem Land darstellt (Christian et al., 2016), setzt sich in Österreich zu einem großen Teil aus Öl (37,1%) und Gas (22,1%) zusammen, biogene Energien betragen rund 15,8%, Photovoltaik liegt bei nur 0,4%. Insgesamt betrug der Bruttoinlandsverbrauch 2019 1.451,1 PJ (BMNT, 2020). Die Zusammensetzung des Bruttoinlandsverbrauch von Energie wird in folgender Abbildung (Abb. 1) dargestellt.

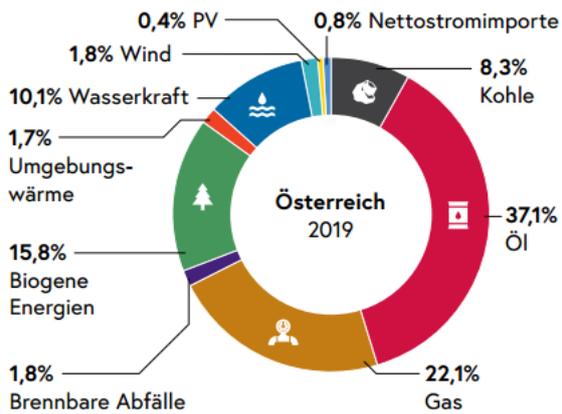


Abb. 1: Bruttoinlandsverbrauch Österreich 2019 (BMNT, 2020).

Zum Vergleich macht der energetische Endverbrauch, definiert als Energie, die den Nutzern zur Verfügung steht, ohne die Energie, die die Energiewirtschaft selbst verbraucht, in Österreich rund 1.140,5 PJ aus. Davon entfallen 36,1% auf den Verkehr, 28,3% auf den produzierenden Bereich, 23,9% auf Haushalte, 9,7% auf Dienstleistungen und 2% auf die Landwirtschaft (BMNT, 2020).

Erneuerbare Energien steuern mit 83% zur Primärenergieproduktion in Österreich bei (BMNT, 2020). Die Erzeugungsstruktur der erneuerbaren Energien in Österreich wird in untenstehender Abbildung (Abb.2) gezeigt. Davon macht Solarthermie 1,7% und Photovoltaik 1,4% aus.

#### Erzeugungsstruktur der erneuerbaren Energien 2019

in Prozent

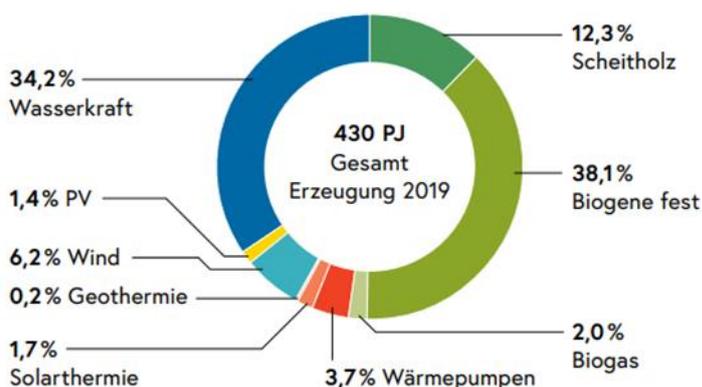


Abb. 2: Erneuerbare Energien 2019 (BMNT, 2020).

Die große Abhängigkeit von fossilen Energieträgern soll durch den Ausbau erneuerbarer Energien stark verringert werden. Im Wärmemarkt soll Biomasse, Solarthermie und Umgebungswärme bis 2030 stark ausgebaut werden (BMNT, 2019).

## 2.3. Europa

Der Primärenergieverbrauch in der EU setzte sich 2018 aus Erdöl (38%), Erdgas (23%), Kohle (13%), elektrische Energie aus Kernkraftwerken (11%), Strom aus Wasserkraft (5%) und zu 10% aus sonstigen erneuerbaren Energien zusammen. National variieren diese Anteile stark, beispielsweise ist der Anteil an Energie aus Kernkraft in Frankreich hoch wohingegen in Österreich die Wasserkraft eine große und wichtige Rolle spielt und in Polen der Anteil an Kohle relativ hoch ist. Weltweit besteht der Gesamtenergieverbrauch 2018 zu 34% aus Erdöl, 24% Erdgas, 27% Kohle, 7% elektrische Energie aus Wasserkraft, zu 4% aus Kernkraft und zu 4% aus regenerativen Energien. Auch hier variieren die Anteile dieser Energieträger national sowie regional stark aufgrund von Energiepolitiken und zu Verfügung stehenden Primärenergievorkommen (Kaltschmitt et al., 2020).

## 2.4. Preisentwicklung fossiler Energieträger und Solaranlagen

Gegen Ende des Jahres 2021 stiegen die Preise der fossilen Energieträger stark an. Beispielsweise erhöhte sich in Deutschland der Gaspreis bei Neuverträgen bzw. Vertragsverlängerungen im Laufe des Jahres um 83%. Zurückzuführen ist dies einerseits auf eine zunehmende Nachfrage nach Erdgas, einen kalten Frühling 2021, den CO<sub>2</sub>-Preisanstieg andererseits aber auch auf die politische Situation (Fischedick, 2022). Vor allem der Ausbruch des Krieges in der Ukraine lies den Preis zusätzlich steigen (Dolna-Gruber et al., 2022). Der Strompreis erhöhte sich vor allem auch, weil das Erdgas durch den Krieg teurer wurde (Haucap und Meinhof, 2022).

Die Nachfrage stieg allerdings bereits im Jahr 2020, in dem die Pandemie ausbrach, an und somit auch der Preis, vor allem für Erdgas und Kohle. Diese Preissteigerungen wirkten sich auch auf den Strompreis aus, der vor allem durch die Entwicklung der Preise von fossilen Energieträgern bestimmt wird (Dolna-Gruber et al., 2022). In folgender Abbildung (Abb.3) werden die Preisänderungen von Strom, Gas und der CO<sub>2</sub>-Preis dargestellt. Am niederländischen Handelsplatz TTF, einem wichtigen Index für die EU, stieg der Preis im März von 122 auf 166 Euro pro MWh (Fischedick, 2022). Der Vergleich des Monats Juli der Jahre 2021 und 2022 verdeutlicht die Preissteigerungen. Erdgas stieg um 72,7% an, Heizöl um 108,5%, und auch Brennholz (50%) und Pellets (75,2%) sind Preiserhöhungen unterworfen. Fernwärme ist im Vergleich um 17,8% gestiegen. Der Grund für den Anstieg des Brennholzes und der Pellets liegt an den steigenden Strom- und Treibstoffkosten für die Produktion und an der erhöhten Nachfrage (Österreichische Energieagentur, 2022). Die Energieversorgungs- und Energiepreiskrise kann zu einer schnelleren Umsetzung der Energiewende führen (Fischedick, 2022). Der Strom aus erneuerbaren Energien kann die Verknappung an Gas kurzfristig nicht kompensieren, langfristig sollte aber der Ausbau dieser die Abhängigkeit von Energieimporten minimieren (Österreichs E-Wirtschaft, 2022). Zukünftige Entwicklungen sind nach Dolna-Gruber et al. allerdings nicht absehbar (Dolna-Gruber et al., 2022).

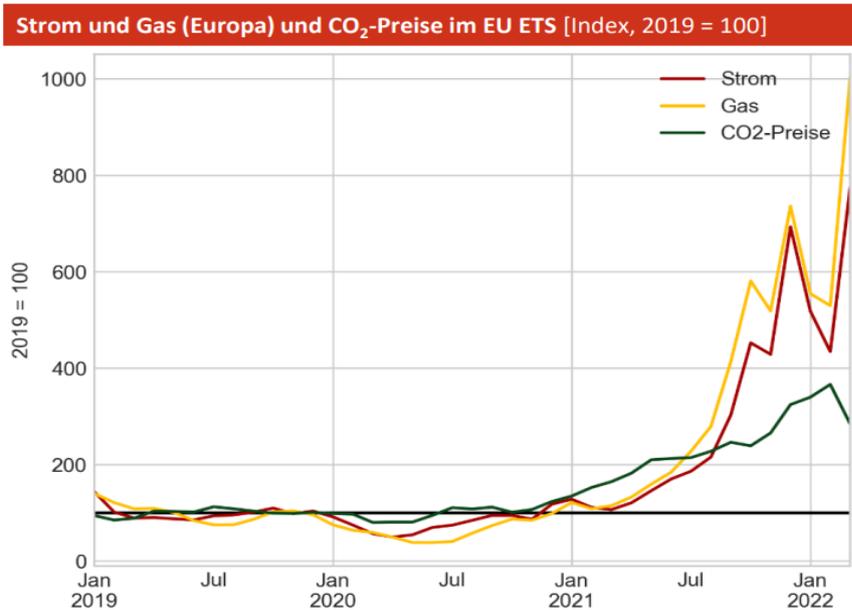


Abb. 3: Strom-, Gas- und CO<sub>2</sub> Preise (Dolna-Gruber et al., 2022).

Erhöhen sich Produktionsmengen so sinken die Preise, wie in folgender Abbildung (Abb. 4) ersichtlich wird. Dargestellt werden der Preis und die Produktion von PV-Modulen ab dem Jahr 1976. Abzulesen ist, dass im Laufe der Jahrzehnte die Produktion stieg und der Modulpreis sank (Wesselak et al., 2017). Zwischen 2010 und 2020 sanken die Modulpreise für PV um rund 90% (Wirth, 2022). Die Abbildung (Abb. 4) wird als zukünftiger Trend der Mengen-Preisentwicklung ausgewiesen (Wesselak et al., 2017; Wirth, 2022).

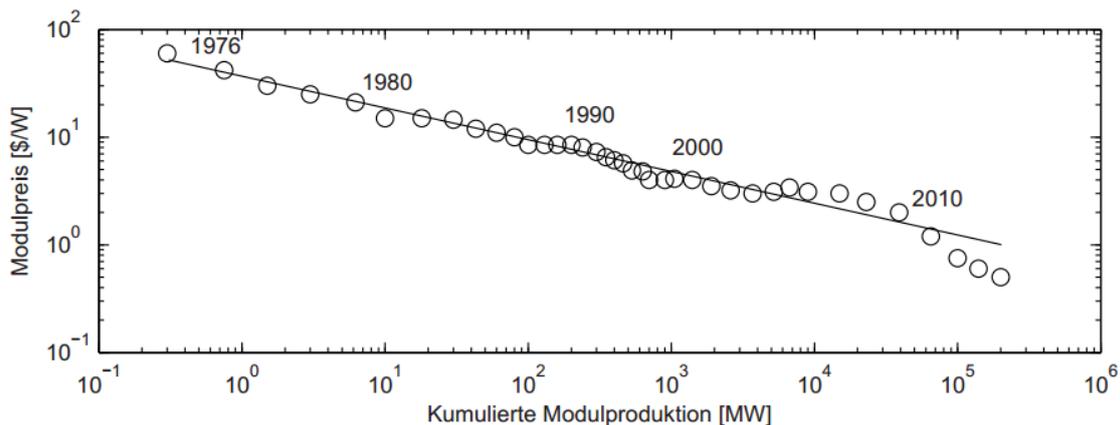


Abb. 4: Preis- und Mengenentwicklung PV-Module in Deutschland (Wesselak et al., 2017).

In Österreich sank seit 2016 der durchschnittliche Verkaufspreis der PV-Module der österreichischen Produzenten, ebenso wie der Mittelwert der Einkaufspreise von österreichischen Anlagenplanern sowie -errichtern. Die Preise für solarthermische Kollektoren unterlagen in den vergangenen 10 Jahren nahezu keinen Schwankungen.

Der Durchschnittspreis liegt bei 426 Euro/kWth oder bei 297 Euro pro m<sup>2</sup> (Biermayr et al., 2020).

Die untenstehende Abbildung (Abb. 5) zeigt, dass der Ausbau von erneuerbaren Energien große Vorteile bringt. Die Erzeugungskosten, die vom Fraunhofer Institut geschätzt wurden, liegen in der EU langfristig bei Photovoltaik zwischen 2 und 6 Cent pro kWh, Windkraft liegt bei 4 bis 8 Cent (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

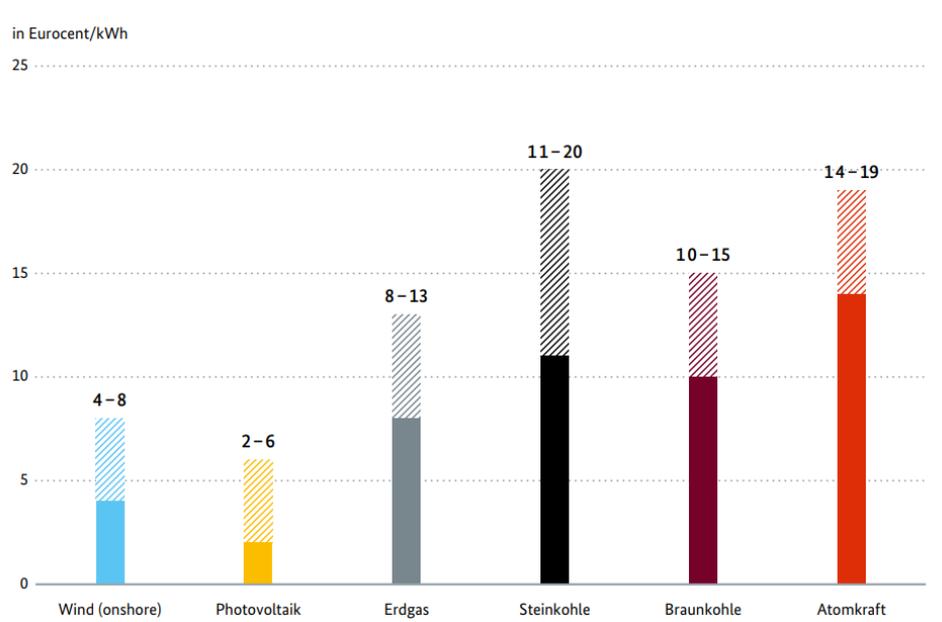


Abb. 5: Vergleich Stromerzeugungskosten in der EU (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

## 2.5. Gesetzliche Rahmenbedingungen

In diesem Abschnitt werden nun die rechtlichen Rahmenbedingungen zu erneuerbaren Energien angesprochen. In diesem Zusammenhang wichtig, sind auch die EU-Ziele.

Da der Energiesektor über 75% der Treibhausgasemissionen der EU ausmacht, wird eine Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien angestrebt. Das Ziel soll sein bis 2050 ein klimaneutraler Kontinent zu werden (Europäische Kommission, s.a.). Als wichtige rechtliche Dokumente im Bereich der erneuerbaren Energien wären folgende zu nennen: Richtlinie über erneuerbare Energien (Renewable Energy Directive, 2009/28/EC), Richtlinie 2018/2001/EU zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, Richtlinie 2018/2002 zur Energieeffizienz, das „Fit for 55“ – Paket, das Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG), die EAG-Investitionszuschüsseverordnung-Strom sowie diverse Förderungen.

Österreich hat einen Zielwert an erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch für das Jahr 2020 von 34%, wobei Österreich 2018 bei

33,4% lag. Nach der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen beträgt das EU-Ziel für 2030 32%. Im Wärme- und Kältesektor soll eine jährliche Steigerung von 1,3% des Anteils an erneuerbaren Energien erreicht werden (Europäisches Parlament, 2018). Nach dem Nationalen Energie und Klimaplan ist für Österreich ein Zielwert von 46-50% vorgesehen. Der Green deal der EU gibt vor, dass bis 2030 55% der Treibhausgasemissionen, bezogen auf das Jahr 1990 (Europäische Kommission, s.a.), reduziert werden sollen (Umweltbundesamt, s.a.), was auch im „Fit for 55“-Paket niedergeschrieben ist. Dieses beinhaltet Vorschläge für die EU-Politik im Bereich Klima, Energie, Landnutzung, Verkehr und Steuern, beispielsweise die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger und mehr Energieeffizienz. Das Paket soll ebenso dabei helfen den Green Deal der EU umzusetzen, welcher Maßnahmen zum Umgang mit Ressourcen enthält und eine Kreislaufwirtschaft in den Mittelpunkt setzt (Bundeskanzleramt, 2021).

Das EAG ist vor allem im Hinblick auf Freiflächen-Solaranlagen und den damit verbundenen Förderungen interessant. Beispielsweise ist nach §33 EAG ein Abschlag von 25% für Photovoltaik Freiflächenanlagen vorgesehen, wenn diese Anlage auf Grünland oder auf einer Fläche steht, die landwirtschaftlich genutzt wird. Die Investitionszuschüsseverordnung-Strom hingegen regelt unter anderem, wann der Abschlag von 25% verringert werden kann, nämlich durch diverse Maßnahmen wie Nisthilfen, Anlegen von Hecken und der Erhalt von Biotopen (§6 Abs 1 EAG-Zuschüsseverordnung-Strom). Dies ist vor allem für den Erhalt der Biodiversität wichtig und beeinflusst damit auch das Mikroklima.

41% des Gesamtenergieträgereinsatzes wird für Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden durch fossile Energieträger verwendet. Das Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWG) befindet sich momentan noch in der Begutachtungsphase. Das Hauptziel soll aber sein bis 2040 eine Dekarbonisierung der Raumwärme zu erreichen. Ab dem Jahr 2023 sollen keine Gasheizungen in Neubauten mehr installiert werden, kaputte Öl- und Kohleheizungen sind durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen, in Neubauten sind diese seit 2020 nicht mehr erlaubt. Ziel ist ebenso die Stilllegung von allen Öl- und Kohleheizungen bis 2035 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, s.a.).

## 2.6. Solarthermie

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Markt der Solarthermie in Österreich sowie über die Grenzen hinaus. Anschließend folgt eine Übersicht über die Funktionsweise.

Die Nutzung solarer Strahlungsenergie erfolgt durch Gewinnung von solarthermischer Wärme und/oder Erzeugung photovoltaischen Stroms. Die Energiemenge, die von der Sonne empfangen werden kann, hängt von diversen Einflussfaktoren ab, wie der geografischen Lage, der Jahreszeit sowie der Tageszeit (Kaltschmitt et al., 2020).

### 2.6.1. Solarthermie in Österreich

Ein erster Anstieg der solarthermischen Energienutzung fand in den 1980er Jahren statt. Vor allem wurden Schwimmbäder beheizt und Warmwasser aufbereitet. Ab 1990 war es schließlich auch möglich Räume zu heizen (Biermayr et al., 2021). In den letzten Jahrzehnten haben solarthermische Anlagen an Bedeutung zugenommen, vor allem durch die hohe Energieeffizienz und die relativ kostengünstige Bereitstellung von Wärme (Evangelisti et al., 2019). Durch die Klimaerwärmung aufgrund fossiler Energien wurde die Solarthermie ein wichtiger Bestandteil der thermischen Energieversorgung (Schabbach und Leibbrandt, 2021).

Zwischen 2002 und 2009 stieg der Markt für Solarthermie in Österreich stark an. Zurückzuführen ist dies auf den Energiepreisanstieg sowie die Erweiterung der Verwendung von Solarthermie auf den Tourismussektor sowie auf den Familienhausbereich. Ein weiterer Grund ist die Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze. Seitdem ist in Österreich der Markt für Solarthermie rückläufig (Biermayr et al., 2021), nach Kaltschmitt et al. (2020) liegt die Ursache in den sinkenden Preisen für Photovoltaik und dem aber konstant bleibenden Preis für die Solarthermie. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Trend in Deutschland und Österreich aufgrund der Kostenreduktion von Photovoltaiksystemen und steigenden Strompreisen fortsetzen wird (Kaltschmitt et al., 2020). Ende 2020 waren insgesamt ca. 4,9 Millionen m<sup>2</sup> thermische Kollektoren in Österreich mit einer Leistung von 3,4 GWh in Betrieb. Damit werden 345.637 Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalent-Emissionen eingespart (Kaltschmitt et al., 2020). Nach Weiss und Spörk-Dür (2020) liegt der Flächenertrag bei wasserbasierten Solarthermieanlagen 2018, mit einer Kollektorfläche von 5.118.625 m<sup>2</sup>, die CO<sub>2</sub> Reduktion bei 704.001 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Weiss und Spörk-Dür, 2020).

Dominierend sind Solaranlagen zur Warmwasseraufbereitung im Bereich der Ein- und Mehrfamilienhäuser (Biermayr et al., 2021). 92% der Kollektoren sind in Österreich verglaste Flachkollektoren, 6-7% unverglaste Flachkollektoren und rund 1% Vakuumröhren-Kollektoren (Kaltschmitt et al., 2020). In Europa sind es 81% Flachkollektoren, 15% Vakuumröhrenkollektoren und 3% unverglaste Wasserkollektoren. 41% sind Thermosyphon-Solarheizungssysteme und 59% gepumpte Solarheizsysteme (Weiss und Spörk-Dür, 2020). 2020 waren österreichweit 4.922.944 m<sup>2</sup> Kollektoren mit einer Leistung von insgesamt 3.447 MWth in Betrieb. Davon sind der Großteil verglaste Flachkollektoren, ca. 240.935m<sup>2</sup> unverglaste Flachkollektoren, ein Anteil (82.203 m<sup>2</sup>) Vakuumrohrkollektoren und 6.168 m<sup>2</sup> Luftkollektoren. In folgender Abbildung (Abb. 6) sind die verschiedenen Kollektorarten, die installierte Kollektorfläche sowie -leistung dargestellt (Biermayr et al., 2021).

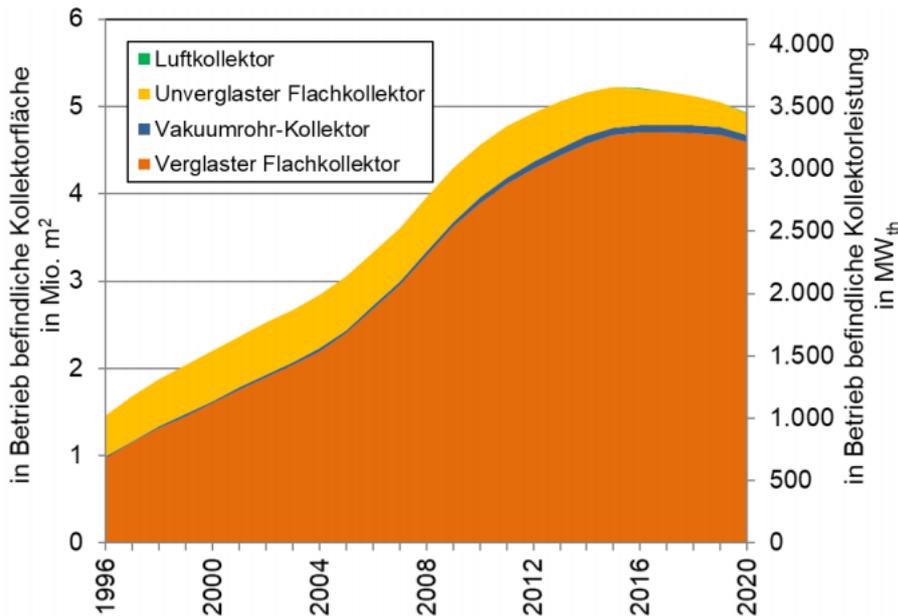


Abb. 6: In Betrieb befindliche thermische Kollektoren in Österreich von 1996-2020 (Biermayr et al., 2021).

Die Sonnenkollektorproduktion nahm in Österreich von 2002 bis 2008 stark zu und sank seit 2009 wieder stetig, was eine Verringerung von 74% innerhalb von 12 Jahren ausmacht. Es wird angenommen, dass sich der Markt zur Warmwasseraufbereitung für Ein- und Mehrfamilienhäuser weiter reduziert, sollten Systempreise gleichbleiben und keine attraktiven Förderprogramme eingeführt werden. Die Entwicklung ist ebenso auf die sinkenden Preise für Photovoltaikanlagen und die verbundenen Direktförderungen, dem Ausbau von Wärmepumpen und den niedrigen Preisen von fossiler Energie zurückzuführen (Biermayr et al., 2021). Auch EU-weit ist ein Rückgang der solarthermischen Anlagen zu verzeichnen, der neben einer wachsenden Konkurrenz von anderen erneuerbaren Energiesystemen auch auf systemische Nachteile zurückzuführen ist. Es wird nämlich ein Back-up System benötigt, da solarthermische Anlagen die Warmwassernachfrage nicht decken können (Kaltschmitt et al., 2020).

In Österreich wird Wachstumspotenzial bei solar unterstützten Nah- und Fernwärmeanlagen aufgrund der Anlagengröße gesehen. Wärme kann so ökonomisch konkurrenzfähig angeboten werden (Biermayr et al., 2021).

## 2.6.2. Solarthermie Weltweit

Die thermische Nutzung von Sonnenenergie variiert je nach Lage von Land zu Land und unterscheidet sich weiters je nach Art des verwendeten Kollektors, des Systembetriebs und nach Verwendungsart (Heizung, Warmwasserbereitung etc.). Ca. 58% der weltweit installierten Solarthermieanlagen sind Thermosiphonsysteme, die

hauptsächlich in wärmeren Gebieten wie in Afrika, Südamerika und -europa, verwendet werden (Weiss und Spörk-Dür, 2020).

Rund 50% des gesamten Endenergieverbrauchs in der EU entfallen auf das Heizen und Kühlen. Der Endenergieverbrauch betrug 2017 5.600 TWh für Heizen und Kühlen, 2.700 TWh für Elektrizität und 4.000 TWh werden dem Verkehrssektor zugeteilt. Ziel ist eine Dekarbonisierung des Wärmesektors zu erreichen. Dabei wird die Solarthermie, neben Biomasse und Geothermie eine wichtige Rolle spielen und einen großen Teil der Nachfrage decken müssen (Biermayr et al., 2020). Abbildung 7 zeigt einen Überblick über die kumulierte installierte Leistung im Jahr 2020 von thermischen Solarkollektoren nach EU-Mitgliedsstaaten. Dabei ist Österreich, nach Deutschland an zweiter Stelle.

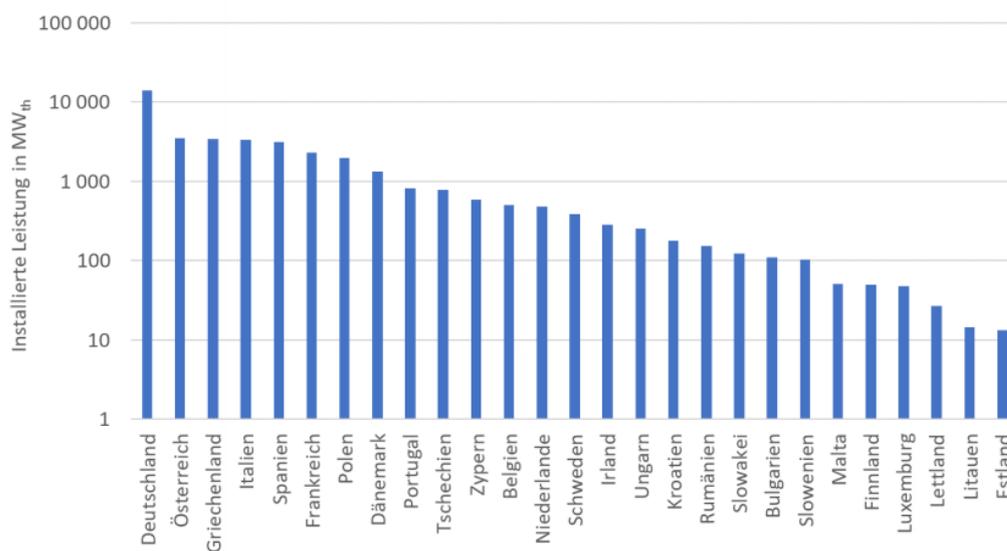


Abb. 7: Thermische Solaranlagen in den EU-Mitgliedsstaaten (Biermayr et al., 2020).

Die Marktentwicklung von Solarthermieanlagen ist je nach Land unterschiedlich (Weiss und Spörk-Dür, 2020). 2020 reduzierte sich der Weltmarkt für Solarthermie gegenüber 2019 um 4%, in Österreich waren es 17%. Ein Marktwachstum verzeichneten Länder wie Deutschland (26%), Brasilien, Zypern und die Niederlande mit je 7%, Palästina und Portugal mit 1% (Biermayr et al., 2021). Eine Steigerung ist in Dänemark, Afrika und Griechenland zu verzeichnen, wohingegen in China, den USA und Mexiko der Markt schrumpft. Das Wachstum in Griechenland beruht auf verschiedenen Faktoren. Zum einen ist es das günstige Klima und Förderprogramme der Regierung, zum anderen die lokale Produktion von langlebigen Systemen. Weltweit sank der Markt zwischen 2018 und 2019 um ca. 6% aufgrund des Rückgangs der Neuinstallationen von Solarthermieanlagen in China. Generell wächst aber in den letzten Jahren das weltweite Interesse an Solarthermieanlagen (Weiss und Spörk-Dür, 2020). In den osteuropäischen Ländern hat die Solarthermie keine Bedeutung (Kaltschmitt et al., 2020).

Der Solarthermiemarkt Deutschlands wuchs im Jahr 2020 im Vergleich zu 2019 um 25%, wobei dies auf das neue sowie lukrative Förderprogramm „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ (BEG) zurückzuführen ist. Weltweit sind 262 thermische Solaranlagen, die an Fern- oder Nahwärmenetze angeschlossen sind, mit einer Kollektorfläche von über 2 Millionen m<sup>2</sup> in Verwendung. Im Vergleich liegt Österreich mit 19 solaren Fernwärmesystemen auf Platz 4. Die Bedeutung von solarthermischen Anlagen für industrielle Prozesse stieg in den letzten Jahren deutlich an (Biermayr et al., 2021). Ca. 60% der weltweit jährlichen Installationen sind kleinere Warmwasserheizungsanlagen und auch kombinierte Anlagen zur Warmwasserbereitung und Raumheizung für Wohnhäuser, Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser, Hotels und öffentliche Gebäude (Weiss und Spörk-Dür, 2020). 2018 lag die thermische Leistung zur Heißwasser- und Raumwärmebereitstellung weltweit bei 480 GW, wobei China davon rund 70% einnimmt. Im Vergleich hat die EU 2018 37,4 GW solarthermische Leistung installiert. Weltweit werden ca. 90% zur Bereitstellung von Warmwasser in Wohngebäuden genutzt und sind eher kleinflächig angeordnet. In Ländern mit hoher Strahlungsintensität sind große Potenziale für solarthermische Anlagen vorhanden (Kaltschmitt et al., 2020). Die Energieerträge aller solarthermischen Anlagen der Welt führten im Jahr 2019 zu einer CO<sub>2</sub> Einsparung von 135,1 Millionen Tonnen sowie einer Einsparung von 41,9 Tonnen Öl. In Europa sind es rund 17 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Weiss und Spörk-Dür, 2020).

### 2.6.3. Funktionsweise

Solarthermische Anlagen dienen grundsätzlich zur Heizungsunterstützung sowie auch zur Erwärmung von Brauch- und Trinkwasser. Dabei muss eine primäre Heizanlage vorhanden sein, da im Winter der größte Wärmebedarf und das geringste solare Angebot besteht (Watter, 2019). Damit auch in Zeiten mit wenig Sonneneinstrahlung die Bereitstellung von Wärme sichergestellt wird, werden Solaranlagen mit anderen Systemen kombiniert, wie einer Wärmepumpe, einem Festbrennstoffkessel oder aber auch einem Öl- und Gaskessel (Kaltschmitt und Streicher, 2009).

Eine solarthermische Anlage besteht aus Kollektoren, einem flüssigen oder gasförmigen Wärmeträgermedium und Leitungen zum Transport. Kollektoren wandeln einen Teil der Solarstrahlung in Wärme um, welche durch das Wärmeträgermedium, welches durch den Kollektor führt, abgeleitet (Kaltschmitt et al., 2020) und folgend in einen Speicher transportiert wird (Evangelisti et al., 2019).

#### 2.6.3.1. Kollektoren

Kollektoren können nach der Konstruktion, nach dem Wärmeträgermedium oder nach dem Temperaturbereich des Betriebs des Kollektors eingeteilt werden. Kollektoren können verglast, unverglast oder Vakuumröhren sein, das Wärmeträgermedium kann Wasser oder Luft sein (Kaltschmitt et al., 2020).

Der Absorber ist ein Bestandteil des Kollektors und wandelt die kurzwellige Solarstrahlung in Wärme um (Kaltschmitt et al., 2020). Als Absorbermaterial werden hauptsächlich Kunststoffe oder Metalle verwendet, da diese temperatur- und UV-beständig sind und zudem eine gute Wärmeleitung ermöglichen. Der Absorber wird oftmals mit einer lichtdurchlässigen Abdeckung bedeckt, um konvektive Wärmeverluste an die Umgebung zu reduzieren und die thermische Rückstrahlung zu bewahren. Die Abdeckung besteht meist aus Glasscheiben, Kunststoffplatten oder -folien können aber auch verwendet werden. Das Gehäuse des Kollektors, welches der Abdichtung der Umgebung sowie der Festigkeit dient, besteht aus einem Rahmen aus Aluminium, Holz, Kunststoff oder einem verzinkten Stahlblech (Kaltschmitt et al., 2020).

Eine Einteilung von solarthermischen Kollektoren wird in folgender Abbildung (Abb. 8) veranschaulicht:

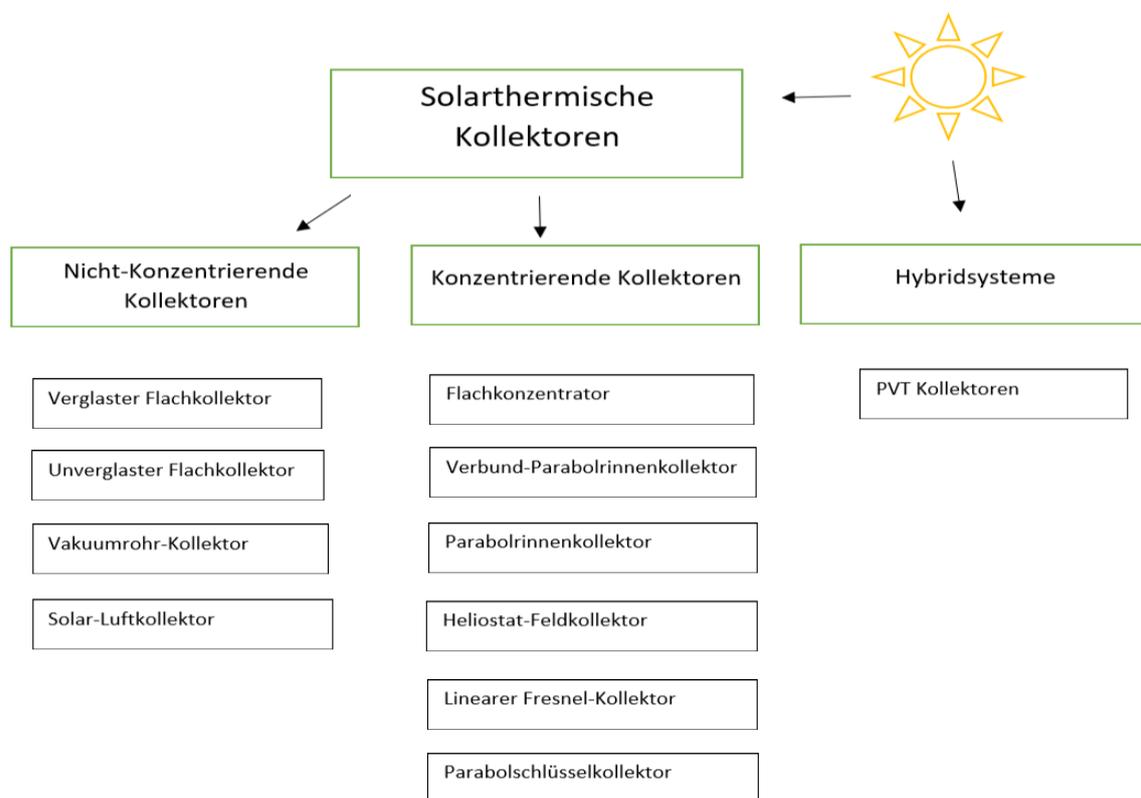


Abb. 8: Einteilung Solarthermische Kollektoren nach Evangelisti et al., 2019.

Nicht-Konzentrierende Kollektoren werden meist in Wohn- und Geschäftsgebäuden verwendet. Konzentrierende Kollektoren findet man eher in Solarstromanlagen, bei diesen wird mit optischen Konzentratoren die Strahlung auf einen Bereich konzentriert, der kleiner ist als die Aufnahme­fläche (Evangelisti et al., 2019). Da in Österreich nicht-konzentrierende Kollektoren verwendet werden, wird auf die konzentrierenden Kollektoren nicht näher eingegangen.

Kaltschmitt et al. (2020) teilen marktübliche thermische Solarkollektoren wie folgt ein:

Tab. 1: Einteilung thermische Kollektoren (Kaltschmitt et al., 2020).

Kollektorart	Unverglaster Kollektor	Flachkollektor	Vakuumröhrenkollektor
Temperatur	Niedrige Temperaturen (20°C bis 30°C)	Mittlere Temperaturen 40°C bis 90°C	Mittlere bis hohe Temperaturen 60°C bis 150°C
Verwendung	Schwimmbadwassererwärmung	Heizungsunterstützung Trinkwarmwasser Solare Kühlung Niedertemperatur-Prozesswärme Fernwärme	Heizungsunterstützung Trinkwarmwasser Solare Kühlung Niedertemperatur-Prozesswärme Fernwärme
	Absorber: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kunststoff</li> <li>• Edelstahl</li> </ul>	Flüssigkeitskollektor Luftkollektor	Sydney-Röhre Heatpipe

Unverglaste Kollektoren werden demnach in Europa hauptsächlich zur Schwimmbadwassererwärmung eingesetzt. Sie weisen einen guten Wirkungsgrad auf, da die Kollektorflüssigkeitstemperatur ähnlich hoch bzw. sogar niedriger als die Außentemperatur ist. Der Absorber bei Flachkollektoren ist in einer Hülle aus Aluminium und wird meist mit einer Glasscheibe bedeckt. Diese minimiert Wärmeverluste, bietet eine hohe Lichtdurchlässigkeit und schützt vor Hagel. CPC-Flachkollektoren sowie Vakuumflachkollektoren spielen keine wichtige Rolle (Kaltschmitt et al., 2020) und werden daher nicht näher beschrieben. Vakuumröhrenkollektoren sind in Österreich nicht sehr stark vertreten (Biermayr et al., 2021). Durch ein Hochvakuum werden bei diesem Kollektor Wärmeverluste minimiert und hohe Wirkungsgrade bei hohen Temperaturen erreicht. Bei niedrigen Betriebstemperaturen ist der Wirkungsgrad im Gegensatz zu Flachkollektoren geringer, da die Absorberfläche in Relation zur Kollektorfläche kleiner ist. Eingesetzt werden diese daher bei hohen Betriebstemperaturen oder bei niedrigen mittleren Lufttemperaturen (Kaltschmitt et al., 2020).

Um die Übertragung von Wärme von den Kollektoren an die Umgebung zu verringern, werden die Innenseiten der Kollektoren isoliert. Materialien, die dafür am häufigsten verwendet werden, sind Mineralfasern, Polyurethan Schaumstoffe oder Mineralfaser-Polyurethan-Verbundstoffe (Evangelisti et al., 2019). Die Wärme wird durch das Wärmeträgermedium durch Rohre abgeleitet. Das Wärmeträgermedium soll eine hohe spezifische Wärmekapazität sowie gute Fließ- und Strömungsgeschwindigkeiten aufweisen. Es soll zudem nicht toxisch sein, biologisch abbaubar, nicht brennbar, kein Gefrieren oder Sieden im Betriebstemperaturbereich vorkommen und Korrosion in den Leitungssystemen nicht unterstützen (Kaltschmitt et al., 2020). Meist ist ein

flüssiges Wärmeträgermedium aus einem Wasser-Glykol-Gemisch aufgrund des Frostschutzes in Verwendung (Watter, 2019).

### 2.6.3.2. Wärmespeicher

Leitungen verbinden Kollektoren und den Speicher. Das Material dieser ist abhängig von der Größe der Anlage und dem Absorbermaterial, wobei meistens Rohre aus Kupfer (Kaltschmitt et al., 2020; Evangelisti et al., 2019) oder Edelstahl eingesetzt werden, wobei auch Rohre aus Stahl und Polyethylen (bei der Schwimmbadwassererwärmung) verwendet werden (Kaltschmitt et al., 2020). Meistens weisen die Rohre einen Durchmesser von 5-15 mm auf (Evangelisti et al., 2029). Um Wärmeverluste zu verringern, werden die Leitungen isoliert, wobei trotz dieser Dämmung Verluste in den Leitungen von ca. 10-15% von der vom Kollektor abgeben Energie auftreten (Kaltschmitt et al., 2020).

Ein Wärmespeicher ist notwendig, um tageszeitliche Schwankungen und Tage mit wenig solarer Strahlung zu überbrücken. Eine angemessene Größe des Wärmespeichers ist aufgrund der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen wichtig. Dieser ist meist ein Flüssigkeitsspeicher, da Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt. In diesem Speicher kommt es zu einer Temperaturschichtung, in dem sich das kältere Wasser unten befindet, da die Wärmeleitfähigkeit gering ist und die Dichte von der Temperatur abhängig ist (Watter, 2019). Ein weiterer Vorteil von Wasser ist, dass es nicht toxisch und kostengünstig ist. Neben Wasser können folgende Materialien für Wärmespeichersysteme ebenfalls verwendet werden: Thermoöle, geschmolzene Salze, Erdmaterialien und Betonblöcke. Thermoöle können im Gegensatz zu Wasser (100°C) einen höheren Temperaturbereich bedienen (bis 400°C). Bei Temperaturen über 400°C werden geschmolzene Salze verwendet, sie haben eine hohe Wärmekapazität, thermische Stabilität, einen hohen Siedepunkt, sind kostengünstig und ungiftig. Erdmaterialien sind als Füllmaterial geeignet (Evangelisti et al., 2019).

Bei fehlendem Sonneneintrag kann die Wärme im Speicher nach 2-3 Tagen durch den Verbrauch oder Wandwärmeverluste verloren gehen, trotz ausreichender Isolierung (Watter, 2019).

### 2.6.4. Umweltauswirkungen

Der Betrieb einer Solarthermieanlage lässt sich nach Kaltschmitt et al. (2020) umweltfreundlich durchführen.

Bei der Solarspeicherherstellung werden Materialien benutzt, die geringe Auswirkungen auf die Umwelt haben. Die Herstellung von Absorberstreifen ist umweltrelevant, vor allem bei Beschichtungsverfahren, die vorwiegend in der Vergangenheit durchgeführt wurden. Hierbei ist der hohe Energieverbrauch und der anfallende Abfall zu nennen. Im Gegensatz dazu sind

Vakuumbeschichtungsverfahren weniger umweltschädlich und werden zunehmend durchgeführt. Zusammengefasst gehen aber nach Kaltschmitt und Streicher (2009) von der Herstellung von Solaranlagen keine signifikant negativen Umweltwirkungen aus, vor allem wenn Umweltschutzvorschriften eingehalten werden. Auch während des Betriebs werden keine Stoffe freigesetzt, die umweltschädlich wirken könnten (Kaltschmitt und Streicher, 2009). Umweltauswirkungen aufgrund von Störfällen sind eher gering. Durch die moderne Technologie sind Austritte des Frostschutzmittels unwahrscheinlich, genauso wie Gesundheitsgefährdungen für den Menschen oder eine Grundwasserbelastung. Regelmäßige Kontrollen sollen Probleme dieser Art vermeiden. Am Ende der Betriebsphase sollen alle Materialien recycelt werden (Kaltschmitt et al., 2020).

Eine Auswirkung auf das Mikroklima einer Freiflächen-Solarthermieanlage halten die Autoren Kaltschmitt et al. (2020) für möglich. Die Beeinträchtigung sehen sie allerdings nur hinsichtlich der Beschattung und ist zu vernachlässigen, da trotz dessen eine extensive landwirtschaftliche Nutzung der Fläche möglich ist. Vorgeschlagen wird eine extensive Weidehaltung von beispielsweise Schafen oder Ziegen (Kaltschmitt et al., 2020). Wenn die Bebauung von Solarthermieanlagen oder PV-Anlagen auf degradiertem Land in Verbindung mit positiven Ökosystemdienstleistungen erfolgt, kann dies positive Umwelteffekte aufweisen. Die Bepflanzung von einheimischen Kulturarten kann den Boden sowie die Bodenstabilität und die Kohlenstoffspeicherung verbessern (Hernandez et al., 2014).

## 2.7. PVT – Photovoltaisch-Thermische Systeme

PVT Systeme kombinieren die Funktionen von PV-Anlagen und Solarthermieanlagen. Ein Kollektor wandelt Sonnenenergie in Wärme und Elektrizität um, wobei die Anlage damit einen höheren Flächenertrag erreicht. Diese PVT-Systeme werden vor allem dort verwendet, wo große Energiemengen benötigt werden, die Fläche aber begrenzt ist. In Europa wächst der Markt dieser Systeme, angeführt von Frankreich, Deutschland und den Niederlanden (Weiss und Spörk-Dür, 2020). PVT-Module werden in abgedeckte und nicht abgedeckte Systeme eingeteilt. Abgedeckte kennzeichnen sich durch einen größeren Widerstand des Wärmeflusses im Modul aus. Es sind daher im Vergleich zu nicht abgedeckten Modulen, höhere Temperaturen erreichbar und damit für die Bereitstellung von Wärme vielversprechender. Allerdings sinkt der elektrische Wirkungsgrad mit steigender Modultemperatur. Abgedeckte Module sind modifizierte solarthermische Kollektoren, die elektrische Energie zusätzlich zur Verfügung stellen. Der Gesamtwirkungsgrad von PVT-Anlagen ist aber dennoch höher als von zwei getrennten Anlagen für Solarthermie und Photovoltaik. Die primäre Nutzung von nicht abgedeckten Kollektoren entspricht der Bereitstellung von elektrischer Energie. Photovoltaikmodule werden hierbei mit einer Kühlung ausgestattet, die einen höheren elektrischen Wirkungsgrad durch die verringerte Zellentemperatur erreichen. Das Kühlmedium nimmt bei dem Kühlungsprozess Wärmeenergie auf, die in Folge als Niedertemperaturwärmesenken

(Trinkwasservorwärmung bei Einfamilienhäusern oder Vorwärmung von Zuluft von Klimaanlage) genutzt werden kann. Das Kühlungsmedium von PVT Modulen ist flüssig, vor allem bei nicht abgedeckten Modulen, oder gasförmig, überwiegend bei abgedeckten Modulen (Kaltschmitt et al., 2020). Am Markt überwiegen wassergeführte unabgedeckte PVT-Kollektoren, gefolgt von PVT-Luftkollektoren, wassergeführten abgedeckten PVT-Kollektoren sowie Vakuumröhren und konzentrierenden PVT-Kollektoren. In Österreich sind 1.950m<sup>2</sup> PVT-Modulflächen mit einer thermischen Leistung von 965 kW<sub>th</sub> und einer elektrischen Leistung von 339 kW in Betrieb (Biermayr et al., 2021).

## 2.8. Photovoltaik in Österreich

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den PV-Markt sowie über die Funktionsweise. Anschließend wird Agri-PV näher erläutert und dient als Beispiel der Doppelnutzung von Energiegewinnung und landwirtschaftlicher Nutzung.

Der Markt für Photovoltaik entwickelte sich in den 1980er Jahren, wurde durch das Ökostromgesetz 2003 weiter aufgebaut und brach schließlich wieder ein. Ab 2009 stieg der Markt aber kontinuierlich an. Auch im Jahr 2020 wurde ein deutlicher Anstieg an PV-Anlagen verzeichnet, der einen Zuwachs von 38% ausmacht. Der Anteil an Photovoltaik zur österreichischen Stromerzeugung beläuft sich auf 2,4%. Die Stromproduktion von österreichischen Photovoltaikanlagen lag 2020 bei 2,043 GWh und führte damit zu einer CO<sub>2</sub>-Äquivalent Emissionseinsparung von 888.063 Tonnen (BMNT, 2020). Der Exportanteil von Photovoltaikmodulen lag bei knapp 57% (Biermayr et al., 2021). Für 2050 wird erwartet, dass Photovoltaik 1/3 des Strombedarfs in Österreich deckt. Die Wirkungsgrade der Module sollten aber erhöht werden, damit der Flächenbedarf nicht zu hoch ausfällt (Biermayr et al., 2021).

Neuinstallierte Anlagen werden zu 96% aufdach montiert, 2,3% sind dachinstalliert, 1,3% freistehend und ein geringer Anteil (0,4%) fassadenintegriert. 2020 sind 71% der installierten Solarzellen monokristallin und 29% polykristallin, Dünnschichtzellen spielen keine wesentliche Rolle (Biermayr et al., 2021). In folgender Abbildung (Abb. 9) werden die Solarzellenarten in Österreich von 2010 bis 2020 dargestellt. Den Grund für die Anteilssteigerung an monokristallinen Solarzellen im Jahr 2020 war leider nicht angeführt.

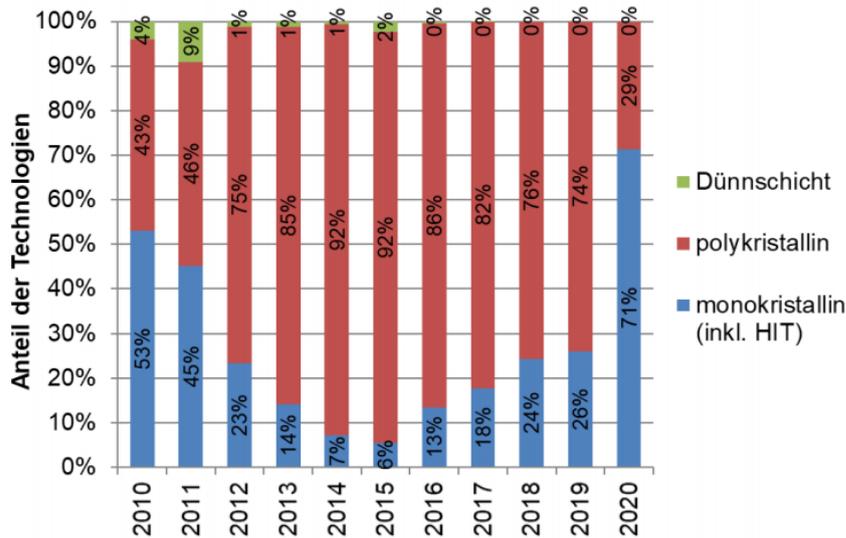


Abb. 9: Solarzellenarten in Österreich von 2010 bis 2020 (Biermayr et al., 2021).

## 2.8.1. Photovoltaik Weltweit

Der weltweite Photovoltaikmarkt stieg im Jahr 2020, im Vergleich zum Vorjahr, um 21% an. China ist Weltmarktführer und verfügt über 1/3 der installierten PV-Anlagen, wobei die USA einen starken Zuwachs erzielte. Marktführende Länder sind Australien, China, Indien, Japan, Korea, Vietnam, Deutschland, Niederlande, Brasilien und die USA. Photovoltaikanlagen tragen insgesamt zu 3,7% der globalen und zu 6% der Nachfrage an Strom in der EU bei. In der EU ist Deutschland 2020 Marktführer, gefolgt von den Niederlanden, Spanien, Polen, Belgien und Frankreich (Biermayr et al., 2021).

### 2.8.1.1. Funktionsweise

Solarzellen von Photovoltaikanlagen wandeln elektromagnetische Strahlung in elektrische Energie um. Photovoltaikmodule bestehen aus Solarzellen, die eine sehr hohe Lebensdauer aufweisen (Wesselak et al., 2017) und die parallel oder seriell verschaltet sind (Blum et al., 2020). Quarzsand, der nahezu unbegrenzt verfügbar ist, wird zur Herstellung von Solarzellen benötigt. Die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie läuft wie folgt ab: Photonen werden im Halbleitermaterial absorbiert, Elektron-Loch-Paare werden generiert und Ladungsträgerpaare im elektrischen Feld eines p-n-Übergangs getrennt.

Halbleiter sind kristalline oder aber auch amorphe Festkörper, die elektrische Leitfähigkeit nimmt mit höherer Temperatur zu. Der am meisten verwendete Halbleiter ist ein kristalliner mit dem Grundstoff Silizium (Wesselak et al., 2017).

Kristalline Solarzellen werden in polykristalline und monokristalline Solarzellen eingeteilt und bestehen aus Silizium. Sie unterscheiden sich im Herstellungsprozess

nach der Kristallisation, optisch sind ebenso Unterschiede zu erkennen. 90% der weltweit produzierten Solarzellen sind kristallin. Eine weitere Art von Solarzellen sind Dünnschicht solarzellen, die sich im Halbleitermaterial sowie im Herstellungsverfahren zu den kristallinen Solarzellen unterscheiden. Auf dem Trägermaterial ist eine Halbleiterschicht, die aus Cadmiumtellurit, Kupfer, Selen/Schwefel Verbindungen und mikrokristallinem und amorphem Silizium besteht. Trägermaterialien sind meist Glas, Metall- oder Kunststofffolien. Der Vorteil bei diesen Solarzellen ist der geringere Einsatz an Halbleitermaterialien sowie die geringere Schichtdicke, allerdings ist der Wirkungsgrad geringer als bei kristallinen Solarzellen (Wesselak und Voswinkel, 2016). Solarzellen sind in Modulen eingebaut und verschaltet. Das Material des Moduls muss witterungsbeständig sein und besteht aus eisenoxidarmen Weißglas oder einem mit Siliziumdioxid beschichtetem Weißglas, auch Antireflexglas genannt. Bei Freiflächenanlagen beträgt der Aufstellungswinkel 30° bis 35°, um die größte Energieausbeute zu erreichen (Wesselak et al., 2017). Photovoltaikanlagen sind für den Insel- und den Netzbetrieb geeignet. Beim Netzbetrieb wird der elektrische Strom in ein Versorgungsnetzwerk eingespeist, der aufgrund von geringeren Kosten im Gegensatz zum Inselbetrieb bevorzugt wird. Beim Inselbetrieb wird der Strom gespeichert, um dann vor Ort verwendet zu werden (Blum et al., 2020).

## 2.8.2. Agri-PV

§5 Abs 1 Z 2 EAG bezeichnet Agri-PV-Flächen als

„Grundflächen, die gleichzeitig zur Stromproduktion mittels Photovoltaik und zur landwirtschaftlichen Produktion genutzt werden“.

Agri-Photovoltaik wurde bereits 1980 in der Theorie erwähnt, Experimente wurden aber erst 2013 in Frankreich durchgeführt (Dinesh und Pearce, 2015). Beim Ausbau von erneuerbaren Energien entstehen Herausforderungen: Ein Beispiel wäre die soziale Akzeptanz bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen, vor allem wegen des Flächenverbrauchs (Schindele, 2021), insbesondere deshalb, weil nur ein Teil der Nachfrage mit Modulen auf Dächern gedeckt werden kann (Dinesh und Pearce, 2015). In weiterer Folge führt der steigende Flächenverbrauch zum Entstehen von Flächenkonkurrenz, auch aufgrund der begrenzt nutzbaren landwirtschaftlichen Fläche. Agri-Photovoltaik, in Frankreich „Agrivoltaic“ und Japan „SolarSharing“ genannt, wäre eine Möglichkeit die Flächenkonkurrenz zu minimieren und die landwirtschaftliche Nutzung mit der Produktion von Solarstrom zu koppeln. Vorteile dabei können sein, dass die höher montierten Kollektoren, die Pflanzen unterhalb schützen können, die Evaporation und Transpiration reduzieren, was vor allem bei Trockenheit nützlich wäre (Schindele, 2021). Schattentolerante Pflanzen können Ertragsverluste reduzieren und die Preise der Erträge erhalten (Dinesh und Pearce, 2015). Ebenso können Module Hagelschutznetze oder Folienregenhauben ersetzen, wodurch sich das Landschaftsbild kaum ändern würde (Schindele, 2021). Ebenso können Photovoltaikmodule in Glashäuser integriert werden. Allein in Wien wird auf

einer Fläche von 43ha Tomatenanbau unter Glashäuser betrieben, auf denen Module installiert werden könnten (Fechner et al., 2018). Landwirtschaftliche Fahrzeuge wie Traktoren sind zudem trotzdem in der Lage unter den Modulen zu fahren sowie eine Flächenbearbeitung oder ähnliches durchzuführen (Schindele, 2021). Erste Versuche zeigten, dass auf Stelzen montierte Paneele, in einer Höhe von 4m, den Ertrag der darunter angepflanzten Salatkulturen nicht minimierten (Dinesh und Pearce, 2015). Eine extensive Bewirtschaftung mit beispielsweise Schafherden ist auch mit niedergestellten PV-Modulen möglich (Schindele, 2021). Die Nutzung als Weidefläche kann Erosion vermindern und auch die Bearbeitung und Pflege der Fläche reduzieren (Hernandez et al., 2014). Die nächste Abbildung (Abb.10) zeigt eine Möglichkeit Agriphotovoltaik umzusetzen, in denen landwirtschaftliche Fahrzeuge den Boden weiterhin bearbeiten können. Die Abbildung zeigt bodenmontierte Solarpaneele.



Abb. 10: Agri-Photovoltaik mit bodenmontierten Solarpaneeelen (Dinesh und Pearce, 2015).

PV-Module können, wie in obiger Abbildung (Abb. 10) erklärt, am Boden montiert werden oder auf Stelzen, bei denen der untere Bereich landwirtschaftlich genutzt werden kann, wie in folgender Abbildung (Abb.11) gezeigt. Bei der Bearbeitung wird die landwirtschaftliche Nutzung nicht beeinträchtigt und auch PV-Module nicht gefährdet. Diese Anordnung weist im Vergleich zu den am Boden montierten Modulen eine bessere Flächennutzung auf, da die ganze Fläche bewirtschaftet werden kann, wobei die Kosten, aufgrund der Stelzen, höher sind (Dinesh und Pearce, 2015). Ebenso ist bei diesem System eine Kombination mit Pflanzenarten denkbar, die Unterstützungssysteme brauchen (Fechner et al., 2018).

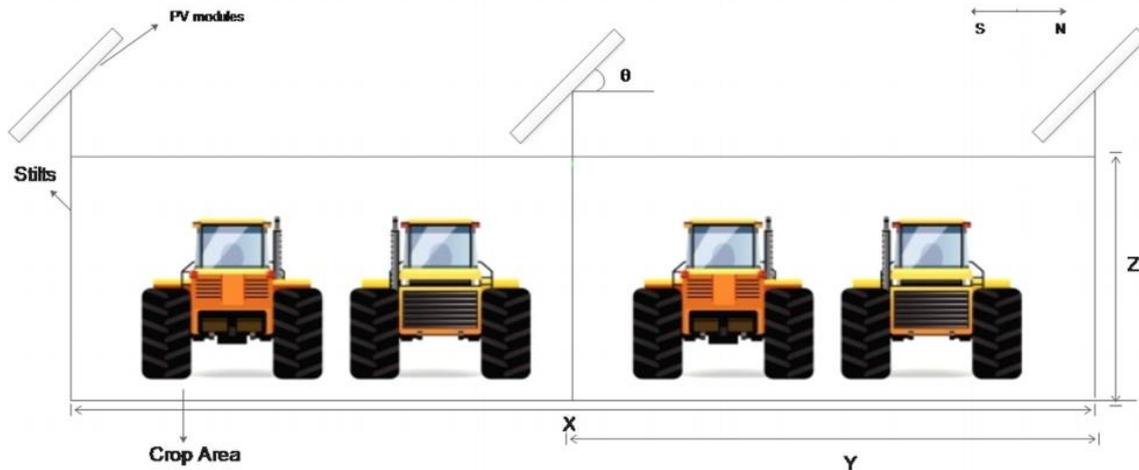
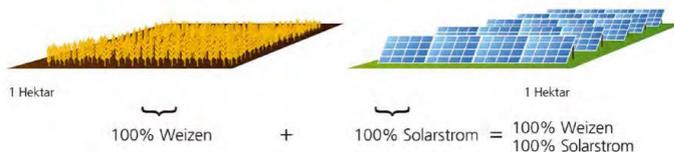


Abb. 11: PV-Module auf Stelzen (Dinesh und Pearce, 2015).

Verschiedene Parameter wie die Pflanzenauswahl, die Montagehöhe, die Sonnenstrahlung, das Klima und der Neigungswinkel der Module spielen eine Rolle bei der Entscheidung welches der oben genannten Systeme angewendet wird (Dinesh und Pearce, 2015). Eine weitere, neue Möglichkeit ist die Installation vertikaler PV-Systeme, die Winderosion minimieren und als Windbrecher genutzt werden können (Trommsdorff et al., 2018).

Agri-PV-Anlagen können die Effizienz steigern, wie in folgender Abbildung (Abb. 12) ersichtlich. 2 Hektar Ackerland werden im ersten Bild getrennt genutzt, im zweiten Bild ist ein Agri-PV-System auf Stelzen veranschaulicht (Fechner et al., 2018).

**Getrennte Flächennutzung auf 2 Hektar Ackerland**



**Gemischte Flächennutzung auf 2 Hektar Ackerland: Effizienz > 60% gesteigert**

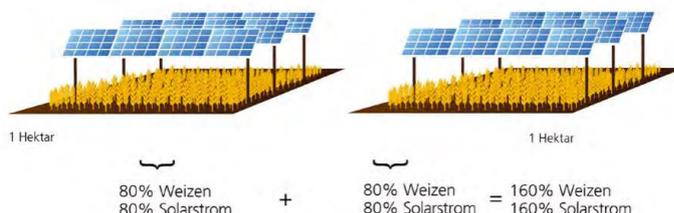


Abb. 12: Effizienz der Flächennutzung auf 2ha Ackerland (Fechner et al., 2018).

Interessant erscheint es, welche Kulturen zur synergetischen Nutzung mit Photovoltaik geeignet sind. Generell können alle Kulturarten unter PV-Modulen angebaut werden, allerdings sind dabei unterschiedliche Erträge zu erwarten. Schattentolerante Pflanzen wie Blattgemüse, Klee gras, Hopfen, Spargel und Bärlauch sind gut geeignet. Mais bewährte sich wiederum nicht zum Anbau unter Modulen

aufgrund der zu hohen Verschattung. In Jahren mit hohem Niederschlag sind Ertragseinbußen von bis zu 20% bei Kartoffeln, Weizen, Gerste, Roggen und Triticale zu erwarten. Insgesamt sollten sich aber die Erträge nicht über 20% reduzieren, um die Akzeptanz der Gesellschaft und der Landwirtschaft nicht zu verlieren (Trommsdorff et al., 2022). Abbildung 13 zeigt einen Überblick über verschiedene Kulturen und deren Eignung für den Anbau unter PV-Modulen. Dabei sind die Erträge der Kulturen, die mit einem „+“ versehen sind, gestiegen, und die mit einem „-“ gekennzeichnet sind, gesunken. Im mittleren, dunkelblauen Kreis sind Pflanzenarten angeführt, bei denen der Ertrag gleichgeblieben ist. Grund für die unterschiedlichen Erträge ist das unterschiedliche Bedürfnis der Pflanzen im Hinblick auf das Lichtangebot (Fechner et al., 2018).

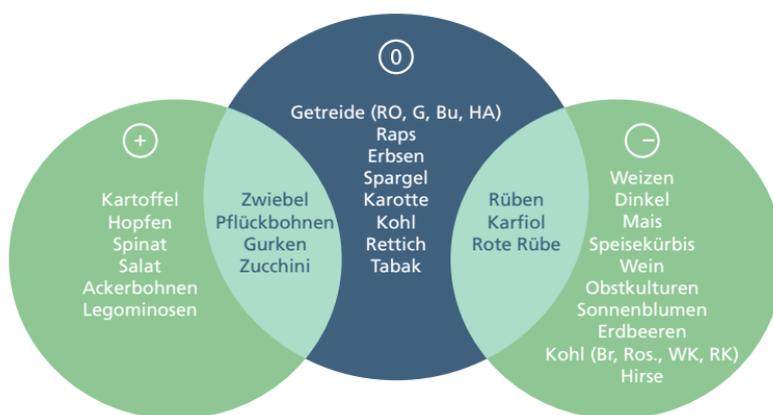


Abb. 13: Eignung von Kulturarten unter PV-Modulen (Oberfell, 2017 zit. n. Fechner et al., 2018).

Der Klimawandel und der einhergehende Temperaturanstieg und die höhere Globalstrahlung können Stressfaktoren für Pflanzen sein. Der Anbau von Pflanzen unter PV-Modulen wird dadurch günstig, da diese Stressfaktoren abgemildert werden (Badelt et al., 2020).

## 2.8.3. Umweltauswirkung

### 2.8.3.1. Flora und Fauna

PV-Freiflächenanlagen können durch die Inanspruchnahme von Flächen Lebensräume für Tiere und Pflanzen minimieren, einen Eingriff oder Verlust dieser Lebensräume bewirken und in Folge Arten verdrängen. Es besteht allerdings die Möglichkeit, die Flächen und damit die Lebensräume zu verbessern (Bird Life, 2021). Nach Kaltschmitt et al. (2020) versiegeln Freiflächen PV-Anlagen Flächen in nur geringem Maße, da ein Großteil der Anlage extensiv landwirtschaftlich genutzt werden kann. Ebenso können zusätzliche Biotopflächen eine Verbesserung der Ökologie darstellen (Kaltschmitt et al., 2020).

Studien kamen zu dem Ergebnis, dass Freiflächen Solaranlagen Tierarten durch die Umzäunung negativ beeinflussen können, den Lebensraum verändern und zu direkter Mortalität führen können (Chock et al., 2020). Weitere Auswirkungen sind der Verlust an Lebensräumen und die Veränderung des Verhaltens, beispielsweise beim Brüten oder bei der Nahrungssuche (Conkling et al., 2020). Kaltschmitt et al. (2020) wiederum ist der Meinung, dass eine Einzäunung der Anlage keine Einschränkung für Kleintiere und Amphibien bedeutet, solange der Zaun genügend Abstand zum Boden aufweist und die Maschengröße geeignet ist. Für Mittel- und Großtiere bedeutet dies einen Lebensraumverlust (Kaltschmitt et al., 2020), sie stellen eine Barriere dar, die eine Zerschneidung der Fläche als Folge haben. Vor allem Fuchs, Dachs, Biber, Wild sind davon betroffen (Dermuth et al., 2019). Im Hinblick auf Wildtierarten sind aber weitere Studien und Entwicklungen vor allem beim Anlagendesign notwendig, um die potenziell negativen Effekte zu minimieren (Chock et al., 2020).

Die Reflexion von Photovoltaikmodulen kann verschiedene Insektenarten aber auch Vögel anlocken, die reflektierendes Licht zur Wasser- oder Wirtserkennung nutzen (Fritz et al., 2020). Vögel können mit den Modulen kollidieren sowie durch die Strahlung verbrannt oder versengt werden (Chock et al., 2020; Conkling et al., 2020). Die Reflexion kann für Vögel und Insekten sehr schädlich und gefährlich sein, soll aber mithilfe von Deckschichten auf PV-Paneelen minimiert werden können. Möglich wäre eine bioreplizierte Deckschicht, die beispielsweise die Oberflächenmikrotextur von Rosenblättern aufweist. Studien zur effizienten Sonnenenergieproduktion, ohne Nachteil durch Deckschichten, und der Minimierung des Einflusses auf Ökologie sollen das Ziel sein (Fritz et al., 2020).

Die Errichtung von Freiflächen Solarparks auf Ackerstandorten kann eine Verbesserung der biologischen Vielfalt, beispielsweise durch das Entstehen neuer Habitate darstellen und die Umgebung positiv beeinflussen. Abhängig ist die Verbesserung auch davon, wie die Fläche vor dem Bau genutzt wurde. Eine Verschlechterung tritt ein, wenn die Fläche zuvor beispielsweise extensives Grünland war. Hier kommt es zu Veränderungen in der Bodenstruktur und im Wasserhaushalt sowie zur Veränderung der Vegetation (Dermuth et al., 2019).

Besonders die veränderten Lichtverhältnisse können die Vegetation beeinflussen. Die Beschattung der Fläche unter den Solarmodulen kann lichtliebende Pflanzenarten verdrängen. Die Überschirmung führt zu einer Änderung der Wuchshöhe und der Blühhäufigkeit (Dermuth et al., 2019). Die Pflanzen bekommen nur das indirekte Licht an den Randbereichen. Dies kann aber in sehr trockenen Gebieten durchaus positiv sein, da Pflanzen während der höchsten Sonneneinstrahlung beschattet werden und gute Verhältnisse für schattentolerante Pflanzen bestehen (Beatty et al., 2017).

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Auswirkungen stark vom Standort, der Technologie und der Anlagengröße abhängen (Dhar et al., 2020).

Beatty et al. (2017) fanden durch ihre Studie und Versuchen in Colorado heraus, dass ein Saatgutmix mit *Bouteloua gracilis* und *Buchloe dactyloides* die höchste Pflanzendichte im Solarpark aufwies. In den Niederlanden wurde von Biesmeijer et al.

(2020) eine Studie zur Pflanzenvielfalt und Bestäubern in einem 39 ha großen Solarpark, mithilfe von verschiedenen Saatgutmischungen durchgeführt. Dabei wurden viele verschiedene Arten gefunden, darunter auch 5 bedrohte Arten. Die verschiedenen Saatgutmischungen hatten dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Bestäuber, die Höhe des Pflanzenwuchses und die Pflanzendichte. Allerdings könnte dies auf die späte Ansaat und die kurze Untersuchungsdauer von einem Jahr zurückzuführen sein. Diese Studie zeigte aber, dass Solaranlagen ein geeigneter Lebensraum für Bestäuber sein können. Gute Bedingungen für Bestäuber in Solarparks wären: genügend Platz zwischen den Modulen für genügend Sonneneinstrahlung, Pflanzenvielfalt, Pflegemaßnahmen und Nistplätze.

Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein hat eine eigene Saatgutmischung entwickelt, die für Freiflächen Solaranlagen geeignet ist. Folgende Tabelle (Tab. 2) gibt einen Überblick über den Inhalt der Saatgutmischung:

Tab. 2: Gumpensteiner Photovoltaikmischung Universal (Krautzer, 2021).

Art		Gew. %
<b>Festuca nigrescens</b>	Horst-Rotschwingel	5
<b>Achillea millefolium</b> <i>ubsp. millefolium</i>	Gewöhnliche Echt-Schafgarbe	0,5
<b>Centaurea jacea</b> <i>subsp. jacea</i>	Gewöhnliche Wiesen-Flockenblume	1
<b>Cynosurus cristatus</b>	Kammgras	8
<b>Daucus carota</b> <i>subsp. carota</i>	Wild-Möhre	0,5
<b>Dianthus carthusianorum</b> <i>ssp. carthusianorum</i>	Karthäusernelke	1
<b>Festuca ovina</b>	Schafschwingel	15
<b>Festuca rupicola</b>	Furchenschwingel	27
<b>Galium mollugo</b>	Kleines Wiesen-Labkraut	0,5
<b>Galium verum</b> <i>s. str.</i>	Echt-Labkraut	0,5
<b>Knautia arvensis</b> <i>subsp. arvensis</i>	Gewöhnliche Wiesen-Witwenblume	1
<b>Leontodon autumnalis</b> (= <b>Scorconeroides autumnalis</b> )	Gewöhnlicher Wiesen-Leuzenzahn	0,5
<b>Leontodon hispidus</b> <i>subsp. hispidus</i> ( <i>s. lat.</i> )	Rauer Löwenzahn	0,5
<b>Leucanthemum vulgare</b> <i>s. str.</i>	Kleine Wiesen-Margerite	3
<b>Lotus corniculatus</b> <i>s. str.</i>	Gewöhnlicher Hornklee	1
<b>Medicago lupulina</b>	Gelb-Klee	1
<b>Plantago lanceolata</b>	Spitz-Wegerich	1
<b>Poa angustifolia</b>	Schmalblättrige Rispe	20
<b>Poa compressa</b>	Platthalmrispe	5
<b>Prunella vulgaris</b>	Gewöhnliche Braunelle	0,5
<b>Salvia pratensis</b>	Wiesen-Salbei	1,5

<b>Sanguisorba minor subsp. minor</b>	Kleiner Wiesenknopf	1,5
<b>Trifolium pratense</b>	Wiesen-Rotklee	1
<b>Silene dioica</b>	Rot-Leimkraut	1
<b>Silene nutans subsp. nutans</b>	Gewöhnliches Nick-Leimkraut	0,5
<b>Silene vulgaris subsp. vulgaris</b>	Gewöhnliches Blasen-Leimkraut	1
<b>Stellaria graminea</b>	Gras-Sternmiere	0,5
<b>Verbascum nigrum</b>	Dunkel-Königskerze	0,5
<b>Aussaatmenge: 3-6 g/m<sup>2</sup></b>		<b>100</b>
<b>80% Gräser, 3% Leguminosen, 17% sonstige ausdauernde Kräuter</b>		

### 2.8.3.2. Mikroklima

Bei einigen mikroklimatischen meteorologischen Größen, wie der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit spielt die Advektion, die horizontale Verfrachtung einer Luftmasse, an einem Standort eine Rolle. Dabei werden die Eigenschaften der Luftmasse, die durch Energieflüsse der Umgebung verändert wurde, gemessen. Andere mikroklimatische Größen, wie beispielsweise die Strahlung oder die Bodentemperatur, werden von der Wärmebilanz vor Ort beeinflusst.

Diese wird an einem Standort durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Q^* - Q_H - Q_E - Q_B = 0$$

Die Wärmebilanz setzt sich folgend aus der Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ), der turbulenten sensiblen (fühlbare) Wärmestromdichte ( $Q_H$ ), der turbulenten latenten (verborgene) Wärmestromdichte ( $Q_E$ ) und der Bodenwärmestromdichte ( $Q_B$ ) zusammen (Zmarsly et al., 2007). Die kurzweilige Strahlungsbilanz ist die Differenz zwischen Globalstrahlung (direkte und diffuse Himmelsstrahlung) und der am Boden reflektierten Strahlung. Die langweilige Strahlungsbilanz wird durch die Differenz von der Atmosphäre und der Umgebung nach unten emittierten langwelligen Strahlung und der vom Boden nach oben emittierten langwelligen Strahlung berechnet. Module beschatten hauptsächlich den Boden (d.h. die direkte Sonnenstrahlung wird zu gewissen Zeiten des Tages blockiert), sie absorbieren aber auch die vom Boden emittierte langweilige Strahlung und emittieren diese, in Abhängigkeit ihrer Temperatur, in Richtung Boden. Außerdem beeinflussen die Module den Wind stark, denn die Hindernisse in der Landschaft führen in der Regel zu Verwirbelungen und zur Schwächung der Windgeschwindigkeit. Ein Tunnel-Effekt ist aber auch möglich, hierbei kommt es zu einer Windbeschleunigung.

Der Ausbau von Freiflächen Solarparks geht mit Landnutzungsänderungen einher, deren Auswirkungen auf Ökosysteme und somit auf das Mikroklima wenig erforscht sind (Armstrong et al., 2016). In einigen wenigen Studien, durchgeführt außerhalb Österreichs, wurde das Mikroklima auf Freiflächen PV-Anlagen untersucht.

Aufgrund dem, im Gegensatz zum Boden, anderen Reflexions- und Absorptionsverhalten der Module können in großen Anlagen Auswirkungen auf das Mikroklima von Kaltschmitt et al. (2020) nicht ausgeschlossen werden.

Die Bodenversiegelung durch den Bau der Anlage, vor allem in Hinblick auf die Fundamente, Wege usw. ist begrenzt und beläuft sich auf ca. 5%. Bei Solaranlagen, die mit Rammprofilen montiert sind, sind es insgesamt nur 2% (Demuth et al., 2019). Die am Boden befestigten PV-Anlagen können die Albedo der Oberfläche potenziell beeinflussen, Schatten bewirken, die Verteilung des Niederschlags verändern und die Windgeschwindigkeit beeinflussen (Armstrong et al., 2014). Auch Dhar et al. (2020) kam zu dem Ergebnis, dass die Albedo des Umfelds, durch die Beschattung der Paneele, erhöht sein könnte. Dadurch können sich die Temperatur und die Niederschlagsmuster bei der Änderung der Windgeschwindigkeit und der Evapotranspiration verändern. Ebenso wird das Niederschlagsmuster verändert (Dhar et al., 2020), die Fläche unter den PV-Modulen erhält weniger Niederschlag, am Rand der Paneele wird die Fläche hingegen viel Wasser aufnehmen (Armstrong et al., 2014). Dies kann im Traufbereich der Module zu einer hohen Verfügbarkeit von Wasser führen und in Folge können standortuntypische Pflanzen, wie Moose, aufkommen (Demuth et al., 2019).

Die Studie von Hassanpour Adeh et al. (2018) zeigte, dass zwei Jahre nach der Installation einer Agri-PV Solaranlage in Oregon mikroklimatische Veränderungen messbar waren. Unterschiede waren in der mittleren Lufttemperatur, der relativen Feuchtigkeit, der Windrichtung und der Bodenfeuchtigkeit signifikant. Vor allem unter den Solarmodulen war die Bodenfeuchtigkeit deutlich erhöht, was zu einer erhöhten Wassereffizienz führte (+328%). In der Spätsaison wurde zudem ein Anstieg der Biomasse verzeichnet, unter den PV-Paneelen kam es zu einer Steigerung der Biomasse von 90% (Hassanpour Adeh et al., 2018). Armstrong et al. (2016) verzeichnete bei einer PV-Freiflächenanlage ohne landwirtschaftliche Nutzung eine Reduktion der Pflanzenbiomasse und der Artenvielfalt unter den Paneelen. Dies kann aber mit Vegetationsmanagement beeinflusst werden (Armstrong et al., 2016).

Armstrong et al. (2016) untersuchten das Mikroklima in England auf einer PV-Freiflächen-Anlage. Gemessen wurden das Boden- und Luftmikroklima, die Vegetation sowie Treibhausgasemissionen unter den Solarmodulen, zwischen den Reihen und auf einer Referenzfläche. Zusammengefasst ist zu sagen, dass Temperaturschwankungen im Boden- und Luftmikroklima saisonal und tageszeitlich auftraten. Unter den Modulen war die Temperatur im Sommer um 5,2°C geringer als zwischen den Reihen und der Referenzfläche und die Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit geringer (Armstrong et al., 2016). Auch Makaronidou (2020) kam zu dem Ergebnis, dass die Temperaturen, für Luft und Boden, unter den Paneelen in

der Vegetationsperiode kühler waren. Der Boden war unter den Modulen feuchter, wobei eine räumliche Variabilität von bodenphysikalischen Eigenschaften, aufgrund von Verdichtungen und dem Vegetationsmanagement wahrscheinlich ist (Makaronidou, 2020).

Von Armstrong et al. (2016) wurde die Austrocknung der Fläche unterhalb der Paneele beobachtet. Im Winter waren die Temperaturen auf den Flächen unter den Modulen wärmer (+1,7°C). Der PAR-Wert, die photosynthetisch aktive Strahlung, war um 92% geringer und wies einen höheren Anteil an diffuser Strahlung unter den Modulen auf (Armstrong et al., 2016). Die Installation von Modulen führt zu Verschattung, und dies verringert somit den PAR-Wert und beeinflusst in Folge das Wachstum und den Ertrag der Pflanzen unterhalb (Badelt et al., 2020).

Die Auswirkungen sind von der Größe der Anlage und den lokalen Bedingungen abhängig (Dhar et al., 2020). Allerdings können Ergebnisse dieser Studien unterstützend für die Optimierung des Designs und des Managements von Solaranlagen wirken (Armstrong et al., 2014).

### 3. Problemstellung

Einige wissenschaftliche Arbeiten haben sich bereits mit den Auswirkungen von PV-Freiflächen-Solarparks auf das Mikroklima beschäftigt (Armstrong et al., 2016; Makaronidou, 2020). Allerdings fehlen in Österreich Studien zu Solarthermieanlagen auf Freiflächen und deren Beeinflussung auf das vorherrschende Mikroklima. Wichtig erscheint dies, vor allem in Hinblick auf den voranschreitenden Ausbau erneuerbarer Energien, das Erreichen der vorgegebenen Klimaziele (Biermayr et al., 2021) sowie aufgrund der gestiegenen Strom- und Gaspreise (Dolna-Gruber et al., 2022).

Da sowohl die Photovoltaikanlage als auch die Solarthermieanlage die Sonneneinstrahlung nutzen (Wesselak et al., 2017), scheint es durchaus möglich, diese hinsichtlich der Umweltauswirkung bzw. der Auswirkung auf das Mikroklima miteinander zu vergleichen. Eine Veränderung des Mikroklimas kann verschiedene Ökosystemprozesse beeinflussen, wie zum Beispiel den Boden, die Temperatur, die Vegetation (Makaronidou, 2020). Ergebnisse von PV-Solarparks in Großbritannien zeigen, dass Schwankungen in Luft- und Bodenklima möglich sind und dies Auswirkungen auf die oberirdische Pflanzenbiomasse sowie der Artenvielfalt haben könnte (Armstrong et al., 2016).

Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden, ob die Solarthermieanlage Parameter wie beispielsweise die Bodentemperatur und -feuchte, Lufttemperatur und -feuchte sowie die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Ebenso scheint interessant zu sein, inwieweit die Ergebnisse der Studien von Photovoltaik-Solarparks mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar sind bzw. ob die Ergebnisse der Messungen der Solarthermieanlage in Österreich Ähnlichkeiten mit den bereits durchgeführten Studien aufweisen. Des Weiteren soll geklärt werden, ob die Kollektoren das Pflanzenwachstum beeinflussen und ob Unterschiede in der Pflanzendichte und im Pflanzenwachstum zwischen verschiedenen Saatgutmischungen und Bearbeitungen erkennbar sind.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit können anschließend aufbauende Projekte und Handlungsstrategien ausgearbeitet und durchgeführt werden. Ebenso können Langzeitmessungen und eine wissenschaftliche Betreuung Aufschluss darüber geben, inwiefern sich das Ökosystem über die Zeit verändert oder wie ein Solarpark positiv auf das Mikroklima wirken kann.

## 4. Methodischer Teil

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden theoretische sowie quantitative Methoden angewendet.

Der theoretische Teil der Arbeit beruht auf einer Literaturstudie. Literatur wurde über verschiedene Plattformen recherchiert wie: „Researchgate“, „Scencedirect“, „Elsevir“, „Bokulitsearch“ und in Bibliotheken. Im Theorieteil werden die Funktionsweise und der Aufbau von Solarthermieanlagen sowie von Photovoltaikanlagen überblicksmäßig dargestellt. Es wird eine Übersicht der Märkte für PV- sowie Solarthermieanlagen österreichweit und auch weltweit gegeben. Ebenso werden die Ergebnisse der Studien zur Auswirkung auf das Mikroklima von PV-Anlagen erläutert und somit eine Grundlage für die eigens durchgeführten Messungen gegeben.

Für den methodischen Teil der Arbeit werden Messungen auf dem Feld der Solarthermieanlage in Friesach durchgeführt. Es werden dabei verschiedene Parameter gemessen wie die Boden- und Lufttemperatur sowie -feuchte, die Windgeschwindigkeit und die Globalstrahlung. Dafür wurden von der Universität für Bodenkultur Wien Sensoren installiert. Die Daten werden mithilfe von Softwares am eigenen Laptop ausgelesen. Folgende Softwares wurden dafür verwendet: „HOBO“, „lolly“ und „ECH20“.

Der Datalogger „HOBO“ maß die Globalstrahlung, die mithilfe der „HOBOWare“ ausgelesen wurde. Der Sensor wurde in der Mitte der Anlage aufgestellt. Die Einheit wird bei diesem Datalogger in Volt angegeben, die anschließend mittels Eichfaktor umgerechnet wurden. Der Messabstand wurde mit 10 Minuten festgelegt.

„Lolly“ wurde verwendet, um die Bodentemperatur- und feuchte aufzuzeichnen. Insgesamt wurden drei dieser Sensoren installiert, einer im Zentrum der Anlage, auf der Seite der Kollektoren und einer auf der Referenzfläche. In Intervallen von 10 Minuten wurden diese Parameter in einer Tiefe von 10 cm, sowie in einer Höhe von 2 und 15 cm gemessen. Da die Daten auf dem Endgerät ohne Einheit ausgegeben wurden, wurden diese anschließend hinzugefügt.

„ECH20“ ist ein Datalogger, der die Lufttemperatur, -feuchte und -druck, die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie den Luftdruck misst. Die Daten werden mithilfe der „ECH20 Utility“ Software auf das Endgerät übertragen. Die Datalogger sind im Zentrum der Anlage sowie auf der Referenzfläche installiert, wobei im Zentrum nur die Lufttemperatur- und feuchte sowie der Luftdruck gemessen wird. Die Messintervalle betragen 10 Minuten.

Auch die Kelag Energie & Wärme GmbH hat Sensoren installiert, die mit der LoRaWAN-Technologie funktionieren. LoRaWAN ist ein Low Power Wide Area Netzwerkprotokoll, bei dem Gateways die Übertragung von Daten zwischen Endgeräten und einem Netzwerk weiterleiten (lora-alliance,s.a.). Folgende Sensoren wurden aufgestellt: iMetos® LORATH SOIL LORA EU 863-870, iMetos® LORAIN

SOIL LORA EU 863-870, Watermark Sensor und ein PI 54 Sensor. Die Sensoren messen die Lufttemperatur und -feuchte, den Niederschlag, Bodentemperatur und -feuchte.

Die Sensoren ermitteln dabei Parameter, die mithilfe der LoRaWAN Technologie an einen Server geschickt werden. So ist es möglich, dass die Kelag Energie & Wärme GmbH Daten über lange Zeiträume erhält. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten wurden die Sensoren nicht am Beginn, sondern am Ende der Vegetationsperiode installiert. Aufgrund dessen war auch ein Vergleich der beiden Messtechniken nicht möglich.

In folgender Abbildung (Abb. 14) ist die Solarthermieanlage ersichtlich, die Kreise geben die Messstationen an. RF bedeutet Referenzfläche, auf der zusätzlich die Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen werden. Bei der Messstation am Rand der Module werden nur die Bodentemperatur und -feuchte gemessen.

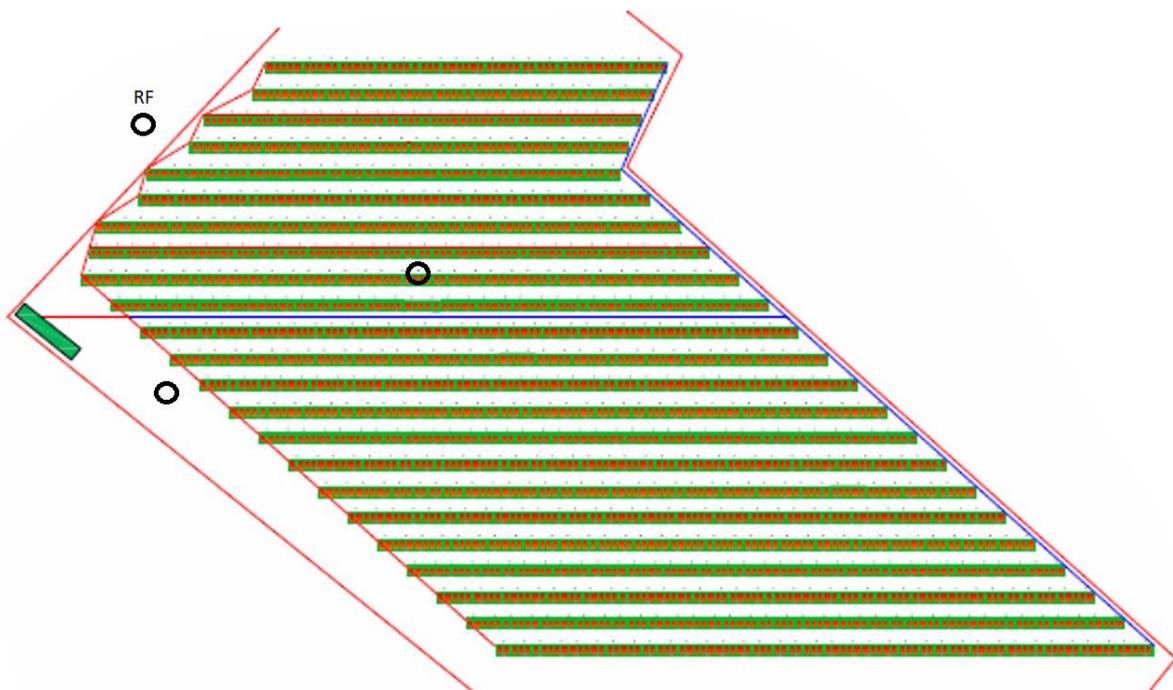


Abb. 14: Messpunkte Solarthermieanlage.

Verwendet wurden neben den eigenen Messungen auch Daten der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) in Friesach. Diese wurden auf der Homepage „ZAMG Data Hub“ heruntergeladen und anschließend aufbereitet. Ausgewählt wurde der Standort Friesach mit Monatsdaten von 1959 bis 2021. Geachtet wurde hierbei vor allem auf die verfügbaren Daten, da teilweise die Aufzeichnungen Lücken aufwiesen und meist nur Monatsdaten zur Verfügung standen. Die Ergebnisse der Auswertung der ZAMG-Daten wurden zur Beschreibung des Klimas in Friesach verwendet.

Für die Auswertung der Daten, die auf der Freifläche gemessen wurden, wurde das Statistikprogramm R verwendet. Die Daten wurden zu Beginn in eine „csv“-Datei

umgewandelt und anschließend eingelesen. Die Werte, die nicht numerisch waren, wurden als solche umgeschrieben. Für alle statistischen Tests wurde ein Signifikanzniveau alpha von  $<0,05$  angenommen und als signifikant angesehen.

## 4.1. Projektbeschreibung Solarthermieanlage Friesach

In der Gemeinde Friesach wurde im Dezember 2020 mit dem Bau der Solarthermieanlage begonnen. Von der KELAG Energie & Wärme GmbH wird ein Fernwärmenetz sowie ein Biomasse Heizwerk zur zentralen Wärmeversorgung der Gemeinde betrieben und unter anderem Ein- und Mehrfamilienhäuser, das Krankenhaus, eine Maschinenfabrik etc. versorgt. Aufgrund der hohen solaren Strahlung eignet sich die Region durchaus zur Bereitstellung von Solarwärme. Die Anlage dient zur Unterstützung der Wärmeaufbringung im Winter, im Sommer kann der Bedarf vollständig gedeckt werden. Der Bedarf an Biomasse, in diesem Fall Hackschnitzel, wird durch die Verwendung der Solarenergie ebenfalls erheblich gesenkt. Insgesamt beträgt der Anteil der Solarthermieanlage an der eingespeisten Wärme im Jahresdurchschnitt 15%. Betriebsparameter werden vom Betreiber als auch von der AEE Intec (Institut für Nachhaltige Technologien) aufbereitet und geprüft. Die Ergebnisse dieser dienen der Optimierung sowie der zukünftigen Planung von Folgeprojekten.



Abb. 15: Solarthermieanlage Friesach (Eigenes Bild).

### 4.1.1. Beschreibung des Klimas

Friesach liegt in Kärnten im Bezirk Sankt Veit an der Glan, hat eine Einwohnerzahl von 4.911, eine Fläche von ca.  $120 \text{ km}^2$  (Stadtgemeinde Friesach, s.a.) und befindet sich auf einer Seehöhe von 641 m (ZAMG, s.a.).

#### 4.1.1.1. Boden

Nach eBod eignet sich der Standort der Solarthermieanlage mäßig für Acker- sowie Grünland. Der Bodentyp ist ein grauer Auboden (eBod, s.a.), der sich dadurch kennzeichnet, dass Flusssedimente im Boden abgelagert wurden. Auböden finden sich in Fluss – und Bachniederungen, mäßigem Gefälle und regelmäßigen Überflutungen (Nestroy et al., 2011). Die Bodenart, welche durch die Korngrößenzusammensetzung bestimmt wird, ist Schluff. Der Großteil der Anlage weist einen Humusgehalt von 1,5 – 4% auf, Kalk ist kaum vorhanden. Der pH-Wert des Bodens ist schwach sauer (5,6-6,5) bis neutral (6,6-7,2). Der Standort ist mäßig feucht, die Durchlässigkeit, welche die Abflussgeschwindigkeit des Wassers im Boden angibt, mäßig bis hoch (eBod, s.a.). Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass auf der verwendeten Bodenkarte die Solarthermieanlage noch nicht eingezeichnet war und daher davon auszugehen ist, dass die Parameter von vor dem Baubeginn stammen.

#### 4.1.1.2. Klima

Die Daten der folgenden Diagramme wurden aus der ZAMG Datenbank genommen und zusammengefasst. Frosttage waren von Oktober bis Mai vorhanden. Die Summe der Frosttage liegt zwischen 88 (2014) und 154 (2021) Tagen, wobei der Durchschnitt bei 120 Tagen im Jahr, bezogen auf den Zeitraum 2010 bis 2021, liegt. Durchschnittlich sind in Friesach pro Jahr 13,7 Nebeltage. Schneefalltage weisen hohe Schwankungen auf. Sie liegen in dem betrachteten Zeitraum zwischen 3 (2020) und 25 Tagen pro Jahr, wobei 2018 die meisten Schneefalltage waren. Der Niederschlag betrug in den Jahren von 2010 bis 2021 zwischen 607 mm (2021) und 933 mm (2014), wobei der Durchschnitt bei 783,75 mm pro Jahr liegt.

Folgende Abbildung (Abb. 16) veranschaulicht die Globalstrahlung, die auch im Zuge dieser Masterarbeit gemessen wird. Die Globalstrahlung ist die am Boden gemessene Solarstrahlung, die sich aus der direkten und gestreuten Strahlung zusammensetzt (Wesselak und Voswinckel, 2016). Die Daten reichen von 2009 bis 2022, vor 2008 wurde die Globalstrahlung nicht aufgezeichnet. Es zeigen sich jahreszeitliche Schwankungen mit Spitzen im Sommer und Tiefen in den Wintermonaten, fehlende Werte sind im Jahr 2015 erkennbar. Die rote Linie ist eine Trendlinie, die anzeigt, dass in den letzten Jahren keine wesentliche Steigerung der Globalstrahlung eintrat.

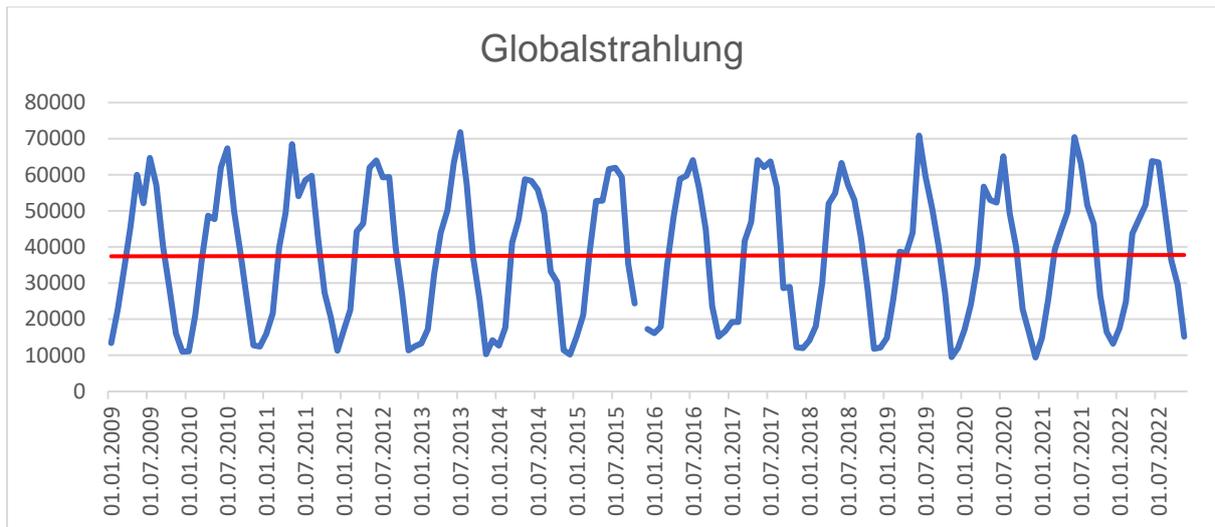


Abb. 16: Mittelwerte der Globalstrahlung ( $\text{J/cm}^2$ ) in Friesach 2008 bis 2021 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).

In nachstehender Abbildung (Abb. 17) ist die Temperaturentwicklung in Friesach veranschaulicht. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte der Temperatur von 1959 bis 2021, gemessen in 2 Metern oberhalb der Erde. Verwendet wurden Temperaturmonatsmittelwerte, mit diesen anschließend Jahresmittelwerte gebildet wurden. Der Minimal- und Maximalwert ist der niedrigste bzw. höchste Monatsmittelwert des jeweiligen Jahres. Bei diesem Diagramm ist ein Temperaturanstieg über fünf Jahrzehnte erkennbar.

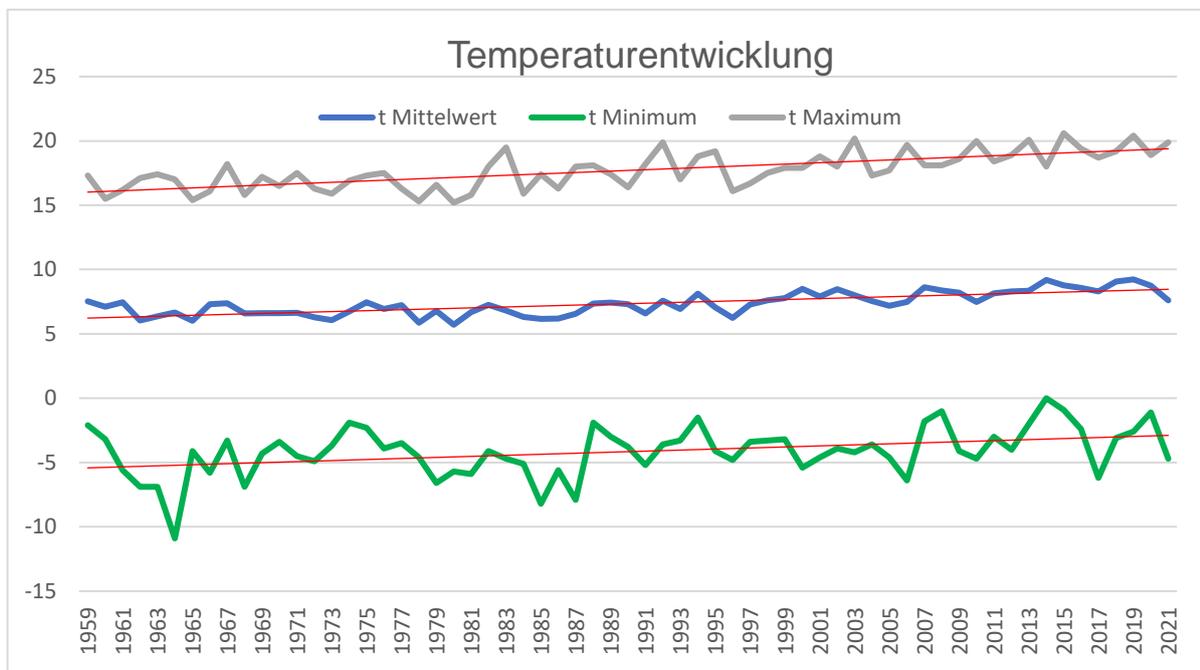


Abb. 17: Temperaturentwicklung 1959-2021 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).

Wie in untenstehendem Diagramm (Abb. 18) ersichtlich wird, stieg auch die Sonnenscheindauer in Friesach leicht an. Es handelt sich hierbei um die gesamten Sonnenstunden der Jahre von 1961 bis 2021. Die Jahre 1978-1980 wurden aufgrund von fehlenden Daten in der Abbildung nicht berücksichtigt. Grund für den Anstieg der Sonnenscheindauer nach dem Bundesamt für Strahlenschutz (2019) ist, dass der Klimawandel zu einer Zunahme der wolkenlosen Tage führt und somit die Anzahl an Sonnenstunden steigt.

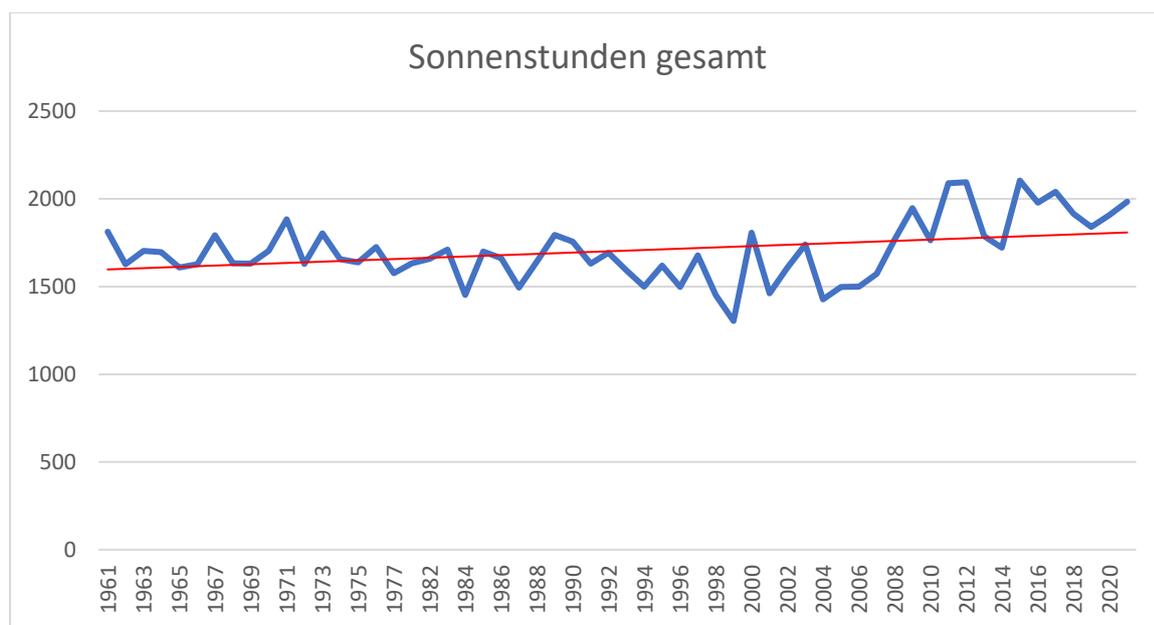


Abb. 18: Sonnenstunden gesamt 1961-2020 (Eigene Darstellung, Daten ZAMG).

#### 4.1.2. Anlagenbeschreibung

Errichtet wurde die Anlage von dem Unternehmen Unser Kraftwerk UK-Naturstrom GmbH, die mithilfe eines Bürgerbeteiligungsmodells die Finanzierung zusätzlich sicherstellte. Mit dem Bau der Anlage wurde im Dezember 2020 begonnen und im September 2021 beendet. Nach der Fertigstellung der Anlage wurde ein Probetrieb durchgeführt, in dem es möglich war, weiteres zu optimieren.

Insgesamt beträgt das Kollektorfeld 5.750 m<sup>2</sup> mit einer thermischen Leistung von 4 MWp. Die Wärme wird über eine Transferleitung von 1.100 Metern zum Heizwerk transportiert. Die Solaranlage liegt an der Landesstraße L 62 und ist über die Transferleitung mit dem Wärmespeicher, der sich direkt neben dem Heizwerk befindet, verbunden. Insgesamt sind 430 Großflächenkollektoren mit einer Fläche von 13,17 m<sup>2</sup> sowie 11 Kollektoren mit einer Fläche von 7,91 m<sup>2</sup> montiert. Diese sind rückwandisoliert, doppeltverglast und nach Süden, mit einer Neigung von 30°, ausgerichtet. Der Reihenabstand entspricht 4,5 m. Die Kollektoren sind auf einer verzinkten Stahlkonstruktion mithilfe von Rammprofilen im Boden montiert. Aufgrund

dessen und der fehlenden Betonfundamente erfolgte beim Bau der Solarthermieanlage auch nahezu keine Versiegelung des Bodens. Neben den thermischen Kollektoren befinden sich auch Photovoltaikkollektoren auf dem Feld. Mit einer Leistung von 28 kWp sorgen diese für den Strom der Umwälzpumpen.

Das Grundstück auf der die Anlage gebaut wurde, ist eingezäunt, wurde aber an drei Seiten bereits begrünt. Ebenfalls weiden seit Mai 2022 Schafe auf der Fläche, um eine extensive landwirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen.

Die Solarkollektoren sind mit einem Wasser-Glykol Gemisch gefüllt, die Transferleitung mit Fernwärmewasser. Diese wird mit einem anderen Druck betrieben. Aufgrund dessen werden diese beiden Kreisläufe durch eine Systemtrennung geteilt. Diese besteht aus einem Plattenwärmetauscher, einer Druckhalteanlage, einem Stagnationskühler, aus Umwälzpumpen, Regelventilen ebenso wie der notwendigen Regel- und Messtechnik. Die Komponenten sind neben der Solarthermieanlage in einem Container, der mit Holz verkleidet wurde, untergebracht. Die Transferleitung verbindet die Solarkollektoren mit dem Wärmespeicher, hat einen Durchmesser von 2x150 mm, ist isoliert und mit einem Leckortungssystem versehen. Durch den Druckunterschied zwischen der Transferleitung bzw. dem Wärmespeicher und dem Fernwärmenetz ist eine weitere Systemtrennung notwendig. Die Wärmeübergabestation umfasst einen Wärmetauscher, Umwälzpumpen, Regelventile und die Regeltechnik. Die Wärmeübergabestation dient unter anderem der Einspeisung der Solarwärme in das Fernwärmenetz.

Der Wärmespeicher umfasst ein Volumen von 1.000 m<sup>3</sup> mit einer Betriebstemperatur von 95°C. An den Innenseiten des Speichers, oberhalb der Flüssigkeit, befindet sich ein Stickstoffpolster, der als Korrosionsschutz fungiert und ein Über/Unterdruckventil, welches vor Druckschäden schützen soll. Zur Dämmung wird Steinwolle verwendet, eine Blechverkleidung dient als Schutz vor der Witterung. Im Sommer wird die nicht benötigte Wärme temperaturabhängig geschichtet und kann an Folgetagen, mit weniger solarer Strahlung, genutzt werden. In den Wintermonaten dient der Speicher zur Speicherung der nicht benötigten Wärme aus den Biomasseheizkesseln. Dadurch können Verbrauchsspitzen im Winter gedeckt werden (Projektbericht, 2021).

#### 4.1.3. Beweidung der Fläche

Seit Mai 2022 befindet sich eine Schafherde auf der Solarthermieanlage in Friesach. Versucht wird hiermit, die Fläche doppelt zu nutzen, landwirtschaftlich in Verbindung mit der Produktion von Wärme. Schindele (2021) und Kaltschmitt et al. (2020) erwähnten eine extensiv landwirtschaftliche Nutzung von Solaranlagen in ihren Publikationen.

Als Grundlage diente unter anderem auch die Studie von Maia et al. (2020), die den Einsatz von PV-Modulen als Schattenspender untersuchten. Module können Nutztiere vor intensiver Sonneneinstrahlung schützen und tragen parallel dazu zur Energieproduktion bei. In der Studie von Maia et al. (2020) hielten sich die Tiere,

Schafe und Lämmer, innerhalb der Versuchsdauer zu 61% in der Sonne, zu 38% unter den PV-Paneelen und zu 1% unter schattenspendenden Tüchern, die als Referenz dienten, auf. Grund hierfür könnte die geringe Wärmestrahlungsbelastung unter den Modulen sein (Maia et al., 2020).

In den folgenden Abbildungen (Abb. 19 und Abb. 20) ist die Schafherde auf der Solarthermieanlage in Friesach abgebildet.



Abb. 19 und 20: Beweidung Solarthermieanlage Friesach (Eigene Bilder).

## 5. Ergebnisse

Über die Vegetationsperiode, Ende März bis Ende September 2022 wurden meteorologische Parameter mithilfe zuvor genannter Sensoren gemessen. Die Temperatur- und Feuchtigkeitsdaten der Messpunkte im Zentrum und der Referenzfläche wurden gegenübergestellt und mögliche Unterschiede auf deren Signifikanz statistisch getestet. Der Datalogger ECH<sub>2</sub>O, der die Windgeschwindigkeit, die Lufttemperatur- und feuchte maß, fiel für 14 Tage im August aus. Grund hierfür war ein Kabel, das wahrscheinlich durch ein vorbeigehendes Schaf gelockert wurde.

### 5.1. Messergebnisse der Freifläche

Die gemessenen Daten wurden mithilfe von GGplots veranschaulicht und ein möglicher Unterschied der Ergebnisse der verschiedenen Standorte mittels statistischen Tests überprüft. Dabei wurde eine Nullhypothese  $H_0$  mit Gleichheit der Daten angenommen.

#### 5.1.1. Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wurde in Grad Celsius gemessen, die Minimumtemperatur im Zentrum während der Messperiode lag bei  $-4,7^{\circ}\text{C}$ , die Maximaltemperatur bei  $33,6^{\circ}\text{C}$ . Auf der Referenzfläche betrug der Minimumwert  $-3,9^{\circ}\text{C}$  und der Maximalwert  $33,6^{\circ}\text{C}$ . Die Durchschnittstemperatur unterschied sich um  $0,1^{\circ}\text{C}$  und lag im Zentrum bei  $14,9^{\circ}\text{C}$ , auf der Referenzfläche bei  $14,8^{\circ}\text{C}$ .

Veranschaulicht wird dies in der folgenden Abbildung (Abb. 21), in den Boxplots des GGplots werden der Median, das erste und zweite Quantil veranschaulicht. Innerhalb der Box liegen 50% der Werte, Punkte außerhalb werden als Ausreißer definiert. Im Boxplot werden die Messungen der Referenzfläche und des Zentrums gegenübergestellt. Über die Vegetationsperiode zeigt sich eine erwartete Temperatursteigerung bis einschließlich dem Monat Juli. Unterschiede zwischen den Messstationen sind im April nahezu keine ersichtlich. In den Folgemonaten Mai, Juni, Juli und August war es im Zentrum meist etwas wärmer.

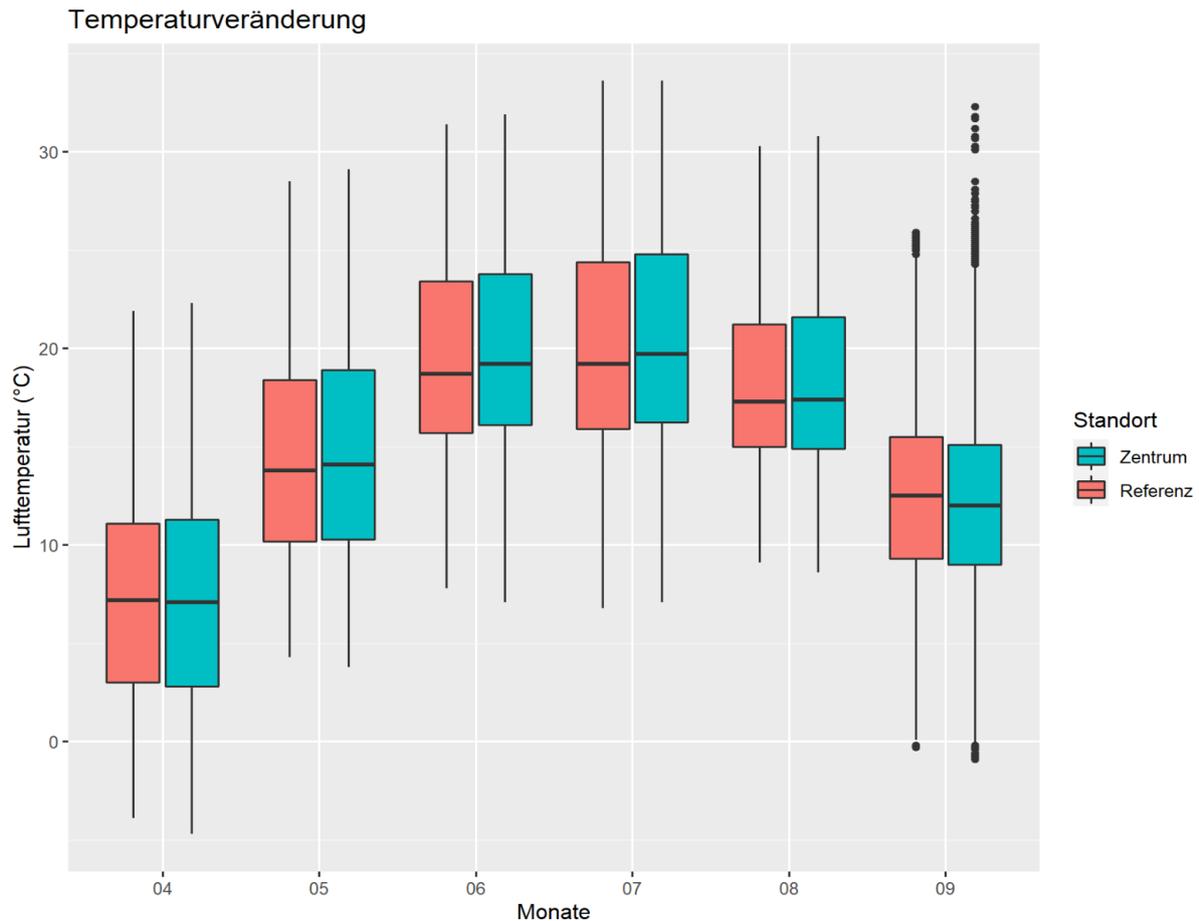


Abb. 21: Lufttemperaturverlauf über Vegetationsperiode.

Um zu beurteilen, ob sich die Messergebnisse des Zentrums und der Referenzfläche statistisch unterscheiden wurde mithilfe statistischer Tests beurteilt.

Die Daten der Lufttemperatur wurden auf Normalverteilung mittels Kolmogorov-Smirnov Test geprüft und das Ergebnis anschließend grafisch mittels Histogramm überprüft. Die Messwerte folgen demnach einer Normalverteilung. Eine Varianzhomogenität ist durch die ähnlich hohe Standardabweichung ebenfalls gegeben und wurde deskriptiv überprüft. Die Daten wurden anschließend einem Zweistichproben t-test unterzogen und zweiseitig durchgeführt. Der p-Wert von 0,10 liegt über dem festgelegten Signifikanzniveau von 0,05. Demnach ist dieser nicht signifikant und die Nullhypothese  $H_0$  Gleichheit der Gruppenmittelwerte konnte angenommen werden.

Der Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf bei schönem Wetter, am 19.07., wird folgend dargestellt. Die Temperatur auf der Referenzfläche war ab dem Nachmittag geringer, vormittags ist der Unterschied der beiden Messpunkte nicht erkennbar. Gut sichtbar ist die Korrelation von Temperatur und Feuchtigkeit, je höher die Temperatur desto geringer die Feuchtigkeit. Die Luftfeuchte war nachts auf der Referenzfläche höher.

## Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf

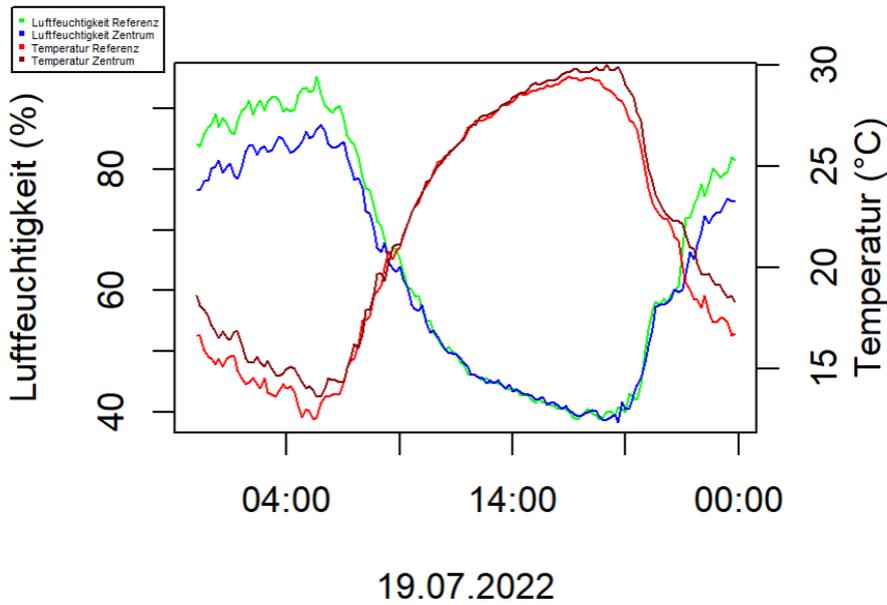


Abb. 22: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf bei wolkenlosem Wetter.

Im Vergleich dazu zeigt der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf bei bewölktem, regnerischem Wetter einen etwas anderen Verlauf. Die y-Achsen unterscheiden sich stark von denen in der vorigen Abbildung, die schönes Wetter zeigt, es war trockener und wärmer. Die Temperatur im Zentrum war tagsüber höher als auf der Referenzfläche, wobei dies bei den Tagestiefsttemperaturen nicht zutrifft. Im Zentrum war es durchschnittlich trockener, wobei der Unterschied zwischen Referenz und Zentrum größer war als bei schönem Wetter.

## Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf

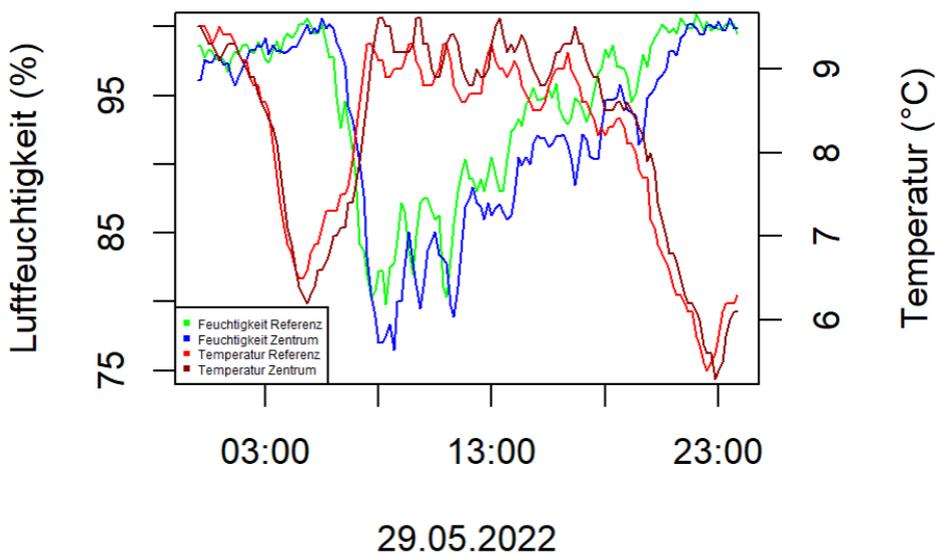


Abb. 23: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf bei bewölktem Wetter.

## 5.1.2. Luftfeuchtigkeit

Der Maximalwert der Luftfeuchtigkeit lag im Zentrum sowie auf der Referenzfläche bei 100%, der Minimumwert bei 24% im Zentrum und 25,9% auf der Referenzfläche. Wie bei den Ergebnissen der Lufttemperatur wurden diese mithilfe von Boxplots im zeitlichen Verlauf visualisiert und die Ergebnisse der beiden Standorte gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die Luftfeuchtigkeit von April auf Mai anstieg, anschließend wieder sank und ab August höher wurde. Die Feuchtigkeit ist in allen Monaten der Vegetationsperiode, außer im April und September, im Zentrum niedriger als auf der Referenzfläche. Vergleicht man die Diagramme der Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur erkennt man, dass ein Anstieg der Temperatur mit einer sinkenden Luftfeuchtigkeit einher geht.

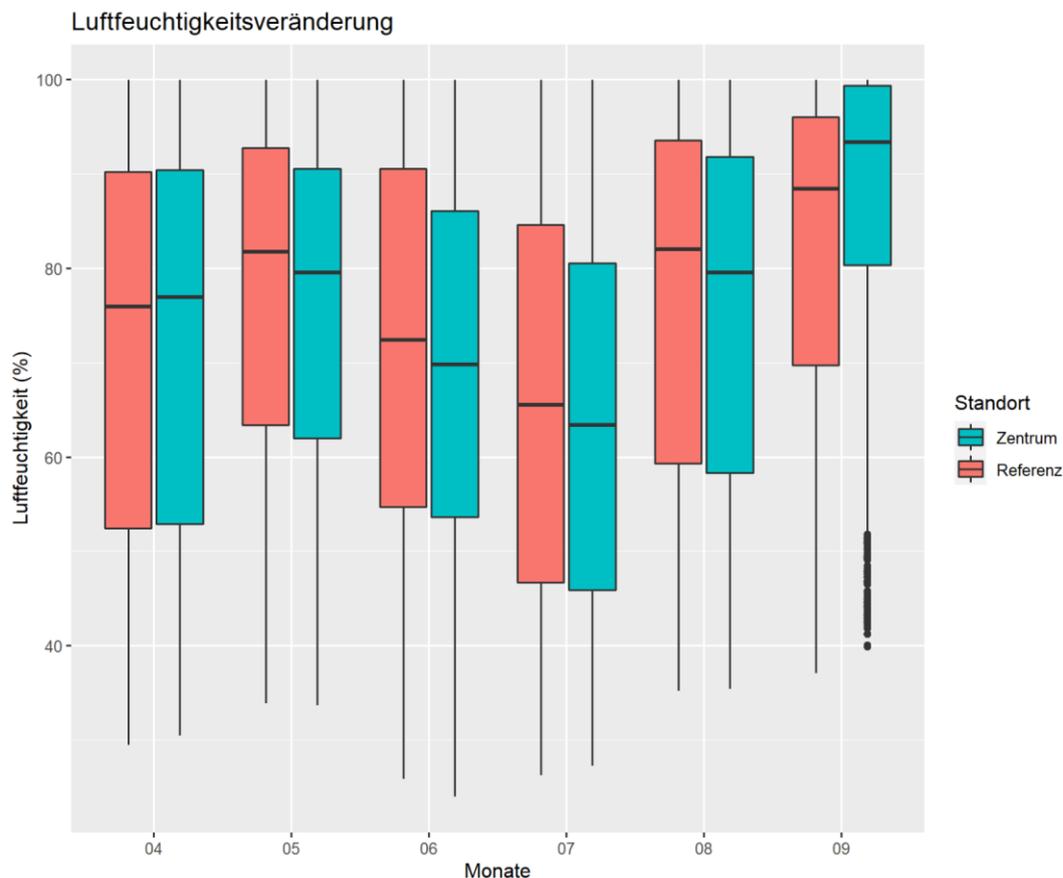


Abb. 24: Luftfeuchtigkeitsverlauf über Vegetationsperiode.

Die Daten der Luftfeuchtigkeit wiesen keine Normalverteilung auf und wurden daher mit dem Mann-Whitney-U Test getestet. Der p-Wert lag mit 0,3 über dem alpha von 0,05, daher kann die Nullhypothese kein Unterschied zwischen den Gruppen angenommen werden. Die Daten der Luftfeuchtigkeit der Referenzfläche und die des Zentrums unterscheiden sich statistisch nicht signifikant.

### 5.1.3. Wind

Die Windgeschwindigkeit wurde auf der Referenzfläche gemessen. Veranschaulicht wird die Windgeschwindigkeit folgender Abbildung (Abb. 25). Erkennbar wird in dieser Abbildung der Ausfall des ECH<sub>2</sub>O Anfang August für 2 Wochen. Es handelt sich hierbei um Tagesmittelwerte, mit zwei Spitzen Mitte April und Mitte Juni. Die maximale Windgeschwindigkeit betrug innerhalb des gemessenen Zeitraumes 8,85 m/s, das Minimum betrug 0,06 m/s, die Durchschnittsgeschwindigkeit lag bei 1,36 m/s.

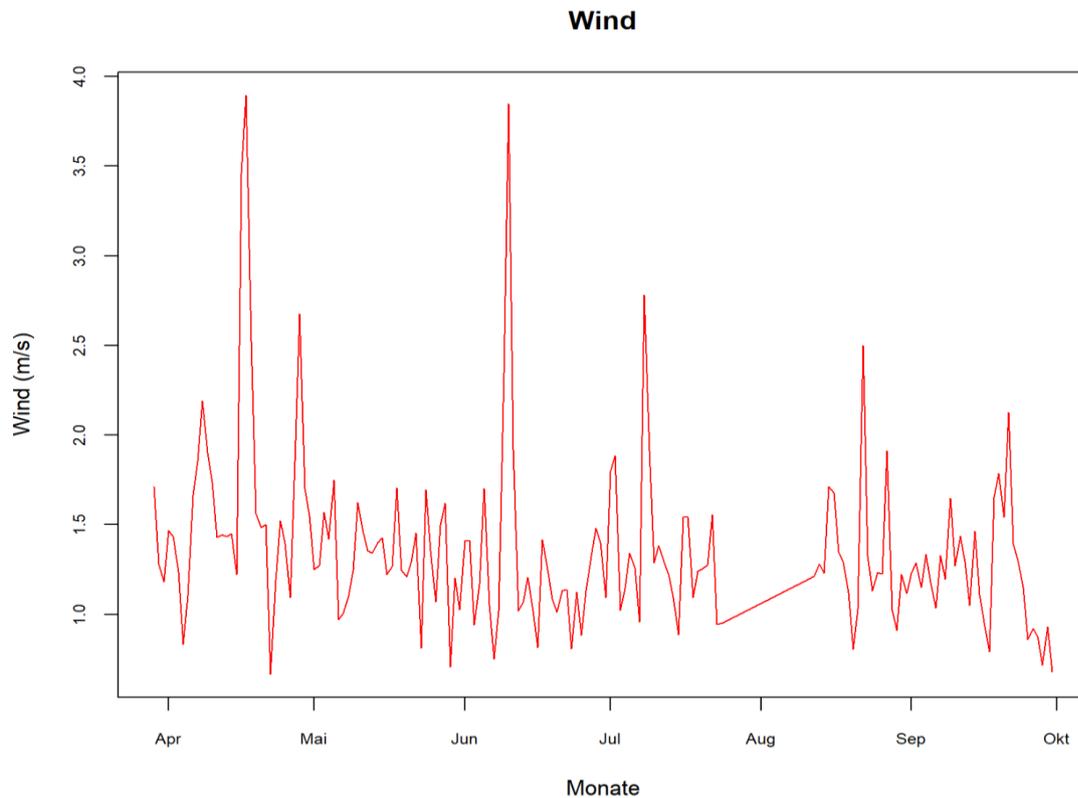


Abb. 25: Windgeschwindigkeit über Vegetationsperiode.

Die Windrichtung kam am häufigsten aus dem Osten und Westen, wie untenstehende Abbildung (Abb. 25) zeigt.

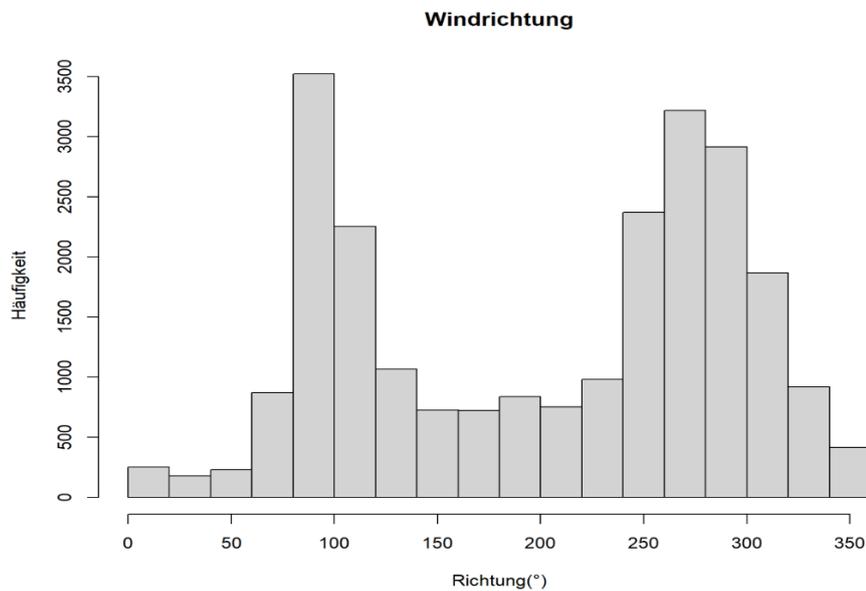


Abb. 26: Windrichtung über Vegetationsperiode.

In folgenden Abbildungen (Abb. 27 und 28) werden die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit je nach Windrichtung gezeigt. Die Überlegung dabei war, dass sich die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit unter den Paneelen von der Referenzfläche abhängig von der Windrichtung aus Süd-Osten oder Nord-Westen unterscheidet. Für den Süd-Osten wurden Werte zwischen 120° und 150°, für den Nord-Westen Werte zwischen 300° und 330° gewählt, wobei mehr Werte in der Gruppierungsvariable Nord-West enthalten sind. Grafisch zeigen sich keine starken Unterschiede der Temperatur je nach Windrichtung. Die Minimumtemperatur liegt bei nordwestlichem Wind bei -4,5°C, der Durchschnitt bei 14°C, das Maximum bei 30,3°C im Zentrum. Auf der Referenzfläche beträgt die Minimaltemperatur -3,4°, der Durchschnitt 14,4° und das Maximum 30,2°C. Bei südöstlichem Wind beträgt die Minimumtemperatur im Zentrum -3,3°C, der Durchschnitt 14,2°C und das Maximum 33,4°C. Im Vergleich dazu weist die Referenzfläche eine Tiefsttemperatur von -3°C, einen Durchschnitt von 14°C und ein Maximum von 32,4°C auf. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Maximaltemperaturen bei südöstlichem Wind höher waren. Die Spannweite ist in den rechten Boxplots größer.

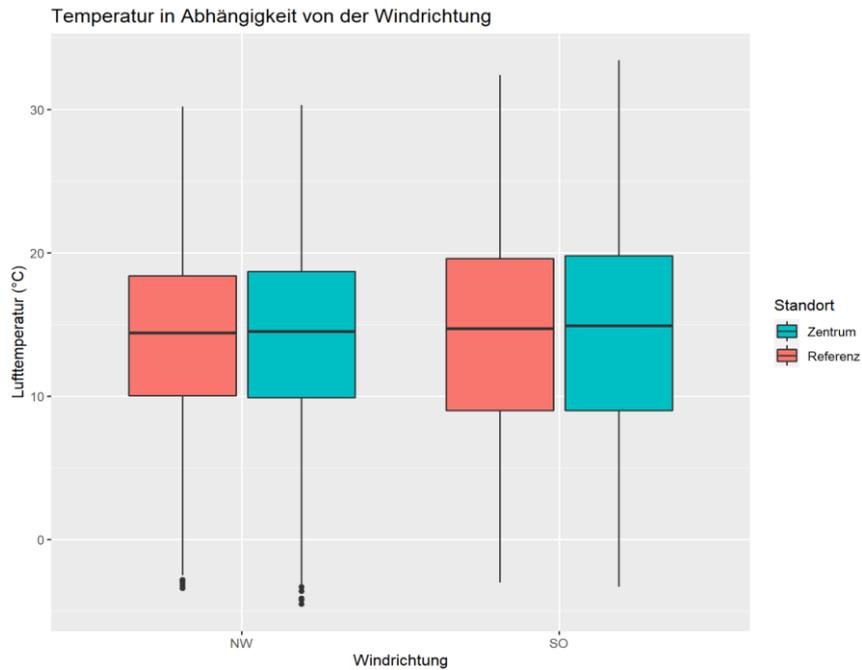


Abb. 27: Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Windrichtung.

In untenstehender Abbildung wird die Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Windrichtung dargestellt. Die Luftfeuchtigkeit unterschied sich zwischen dem Zentrum und der Referenzfläche bei nord-westlichem Wind nur in der minimalen Luftfeuchte um 1,5% und liegt im Zentrum bei 24,9% und auf der Referenzfläche bei 26,4%. Der Durchschnitt beträgt 73%, das Maximum 100%. Ebenso unterschied sich die Luftfeuchtigkeit bei südöstlichem Wind vor allem im Minimum, dieses lag im Zentrum bei 26,8% und auf der Referenz bei 28,1%. Der Durchschnitt beträgt 74%, das Maximum auf der Referenzfläche und im Zentrum 100%.

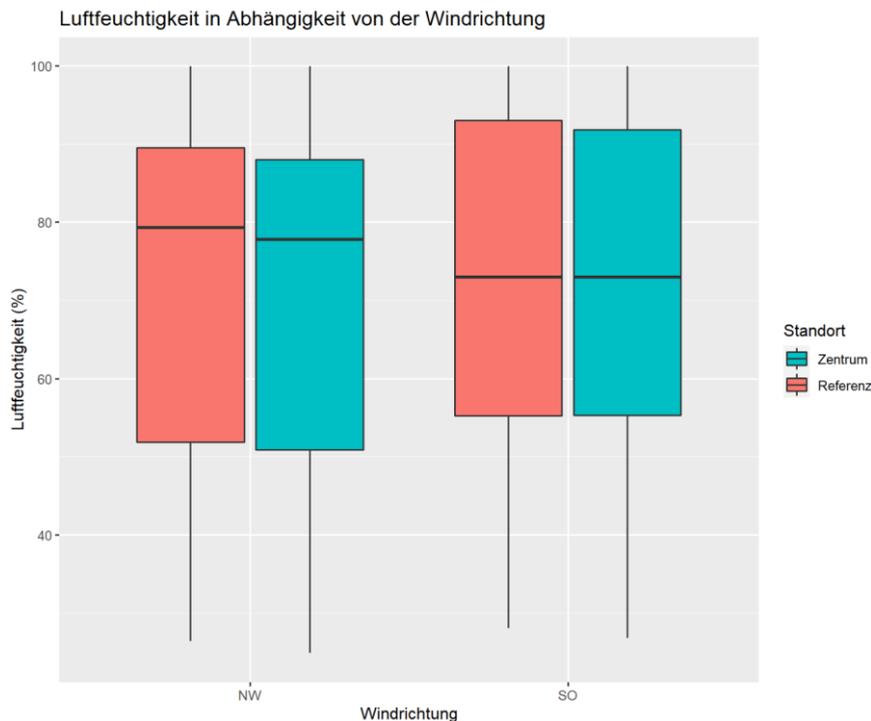


Abb. 28: Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung.

#### 5.1.4. Globalstrahlung

Die Globalstrahlung wurde im Zentrum mithilfe zweier Sensoren gemessen, wobei einer davon über den Modulen und einer darunter installiert war. Es zeigen sich erwartete tageszeitliche Schwankungen mit Spitzen. Die Betrachtung der Aufzeichnung über die Vegetationsperiode hinweg zeigte einen Anstieg der Globalstrahlung unterhalb der Paneele, allerdings keine Steigerung der Globalstrahlung oberhalb über die Monate hinweg. Ein Trend konnte hier also nicht verzeichnet werden. In untenstehendem Plot verzeichnen die roten Linien die Globalstrahlung oberhalb der Paneele, die blauen unterhalb. Die Daten wurden in Volt ausgegeben, anschließend in Millivolt umgerechnet und mittels Eichfaktor die Spannung oben mit 35,7 und die Spannung unten mit 58,8 in  $W/m^2$  umgerechnet. Ausreißer von über 0,03 Volt wurden entfernt. Anfang August fiel der Datalogger für zwei Tage aus, Ende September wies die Strahlung oberhalb sehr geringe Werte auf. Dies zeigt die Limitation von Messungen auf Freiflächen.

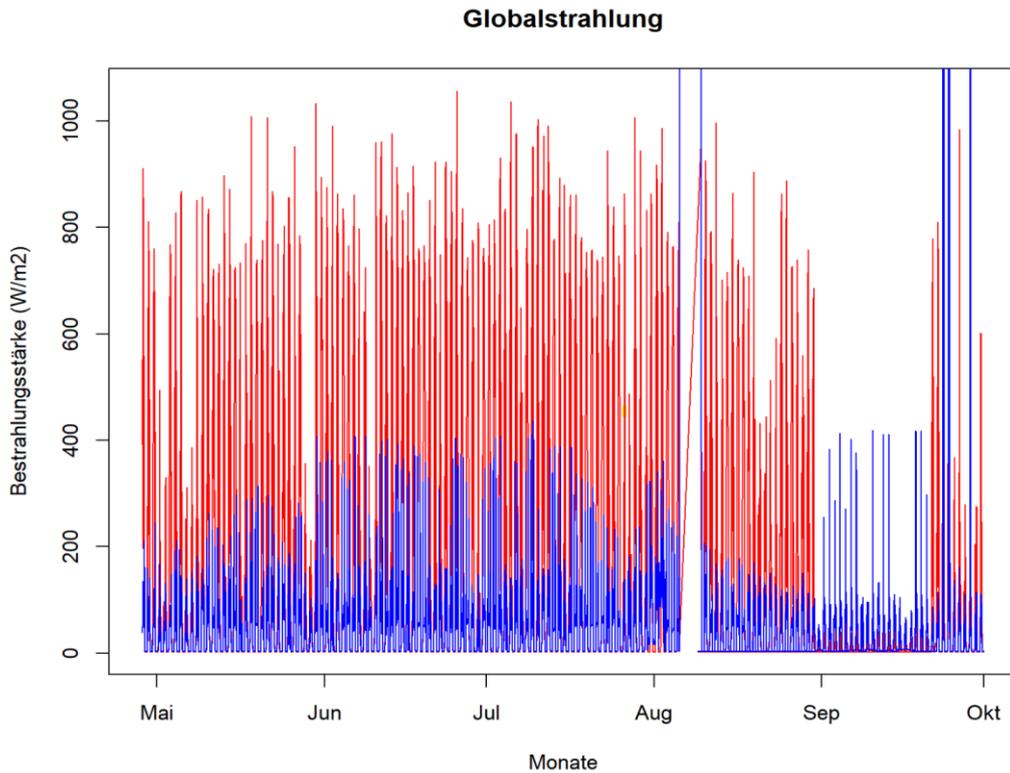


Abb. 29: Globalstrahlung Friesach.

Die Gegenüberstellung von Tagen mit verschiedener Wetterlage zeigen folgende Abbildungen. Aus diesen kann geschlussfolgert werden, ob ein Tag bewölkt oder sonnig war. Im folgenden Diagramm sieht man einen sonnigen Tag am 19.07. und einen bewölkten Tag am 29.05. An der y-Achse ist die Bestrahlungsstärke erkennbar, die Tiefen der roten Linien, die Globalstrahlung ober den Paneelen am 29.05., zeigen, wann die Strahlung durch vorhandene Wolken verringert wurde.

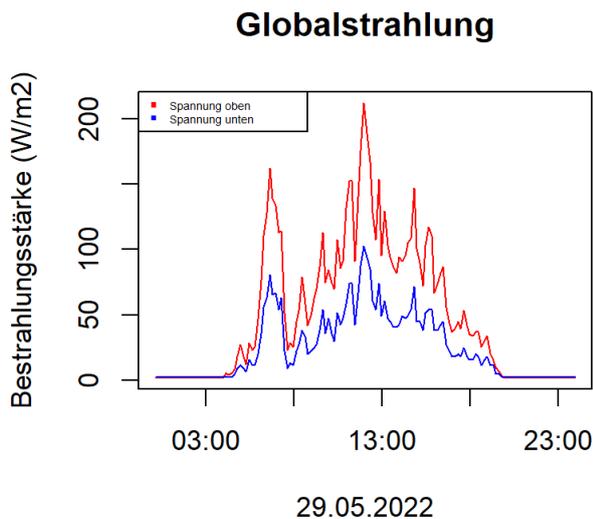


Abb. 30: Globalstrahlung 29.05.2022.

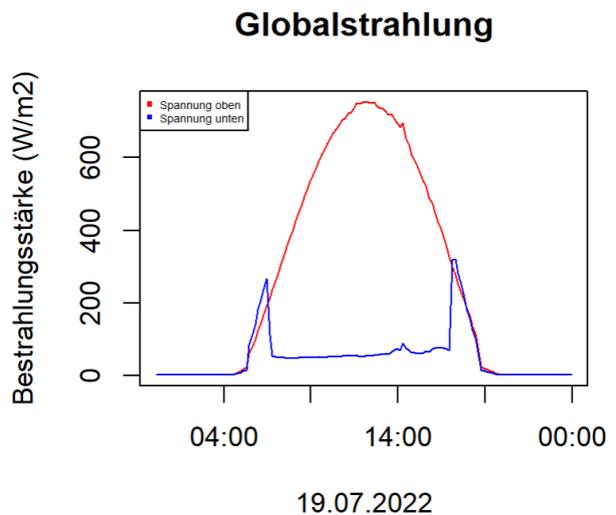


Abb. 31: Globalstrahlung 19.07.2022.

### 5.1.5. Bodentemperatur

Die Bodentemperatur wurde in einer Tiefe von 10 cm an drei verschiedenen Standorten gemessen. Zudem wurde in 2 cm bzw. 15 cm die bodennahe Temperatur aufgezeichnet. Verglichen wurden die Daten je Messhöhe in Hinblick auf die verschiedenen Messpunkte.

Es wurde in Folge, wie bei Lufttemperatur und -feuchte, ein statistischer Test durchgeführt, um zu sehen, ob ein signifikanter Unterschied der Bodentemperatur zwischen den Standorten vorhanden ist. Mithilfe des Kolmogorov-Smirnov Tests wurde auf Normalverteilung der Daten getestet, da für den Shapiro-Wilk Test die Stichprobe zu groß war. Der p-Wert im Kolmogorov-Smirnov Test war hochsignifikant, was darauf hindeutet, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Allerdings besteht bei großen Stichproben die Möglichkeit, dass fälschlicherweise der p-Wert sinkt und eine Signifikanz angezeigt wird (Field, 2013). Damit hier keine falsche Annahme getroffen wird, wurde mithilfe von Histogrammen die Verteilung überprüft. Alle Daten der Bodentemperatur waren demnach normalverteilt, mit Ausnahme der Daten im Zentrum bei -10 cm.

In folgendem Diagramm wird die bodennahe Temperatur in 15 cm Höhe je Standort im Laufe der Monate dargestellt. Wie bei den Grafiken der Lufttemperatur, ist auch hier ein Anstieg der Temperatur im Laufe der Sommermonate zu sehen. Im April und Mai ist die Temperatur am Messpunkt Außen und auf der Referenzfläche wärmer als unter den Paneelen. In den folgenden drei Monaten ist die Referenzfläche die mit der geringsten Temperatur in 15 cm Höhe. Auf dieser Fläche wurde bis September nicht gemäht, es weideten keine Schafe und die Gräser und Hecken konnten frei wachsen.

Die höchsten Temperaturen wurden am Standpunkt Außen gemessen, mit einer Durchschnittstemperatur von 16,2°C, einem Maximum von 37,3°C und einer Minimumtemperatur von -4,6°C. Im Vergleich wurden im Zentrum eine Durchschnittstemperatur von 14,8°C und auf der Referenzfläche von 15,5°C gemessen.

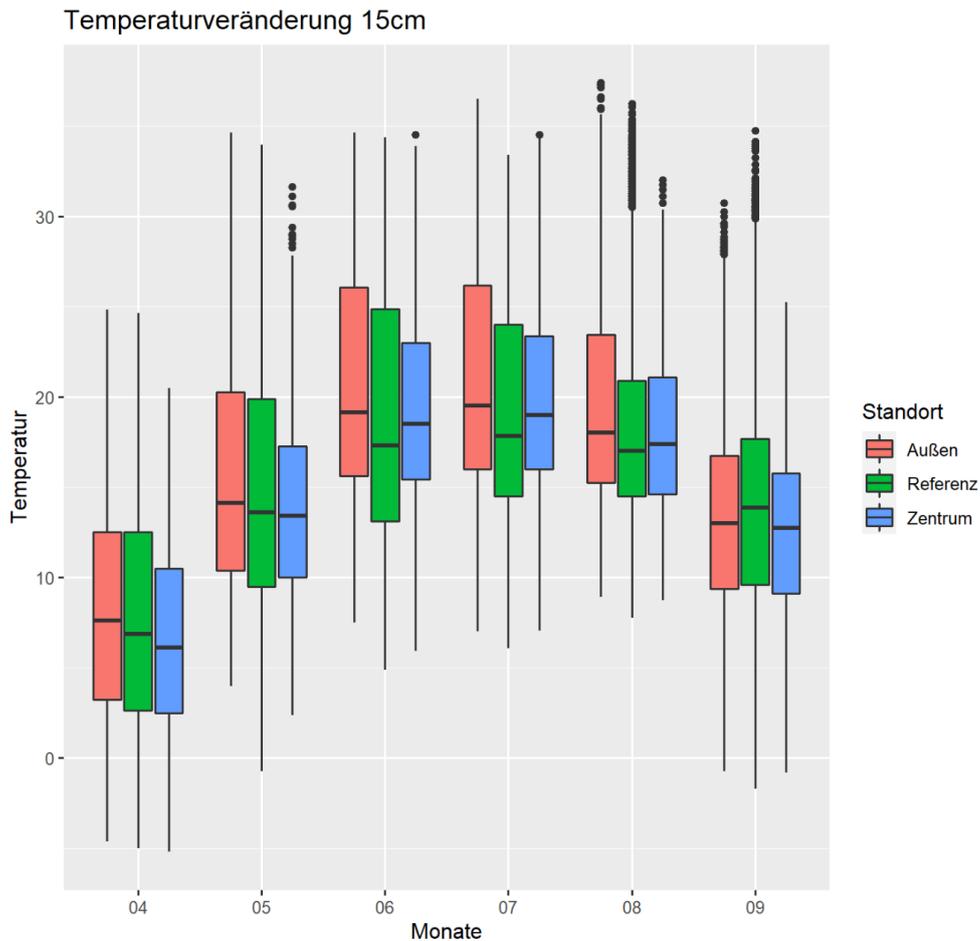


Abb. 32: Bodennahe Temperaturveränderung über die Vegetationsperiode 15cm.

Die Daten wiesen eine Normalverteilung auf, allerdings war keine Varianzhomogenität gegeben, weshalb keine ANOVA durchgeführt wurde. Aufgrund dessen wurde mit dem Kruskal-Wallis Test die statistische Signifikanz geprüft. Der p-Wert lag unter dem festgelegten alpha von 0,05. Durch das hochsignifikante Ergebnis wurde die Alternativhypothese  $H_1$  von Ungleichheit der Mittelwerte über die Gruppen angenommen. Anschließend wurde eine post-hoc Analyse mittels pairwise.t-test durchgeführt, um zu erkennen welche Gruppen signifikant verschieden sind. Dabei muss der p-Wert angepasst werden, was mit `p.adjust(bonferroni)` gemacht wurde. Alle Gruppen unterscheiden sich signifikant.

In 2cm Höhe wurden geringere Minusgrade im Vergleich zur Messhöhe in 15cm gemessen. Im Zentrum lag das Minimum bei  $-2,1^{\circ}\text{C}$ , der Durchschnitt bei  $14,4^{\circ}\text{C}$  und das Maximum bei  $27,2^{\circ}\text{C}$ . Die geringste Minimumtemperatur wies die Referenzfläche auf, diese lag bei  $-2,5^{\circ}\text{C}$ , die Durchschnittstemperatur bei  $15,9^{\circ}\text{C}$  und das Maximum bei  $31,5^{\circ}\text{C}$ . Die höchsten Werte wurden am Messpunkt Außen aufgezeichnet, die Minimumtemperatur lag bei  $-1,4^{\circ}\text{C}$ , der Durchschnitt bei  $17,2^{\circ}\text{C}$  und das Maximum bei  $36^{\circ}\text{C}$ . Wie im untenstehenden Diagramm erkennbar, war der Messpunkt Außen in allen gemessenen Monaten, mit Ausnahme des Septembers, der mit der höchsten bodennahen Temperatur in 2cm Höhe.

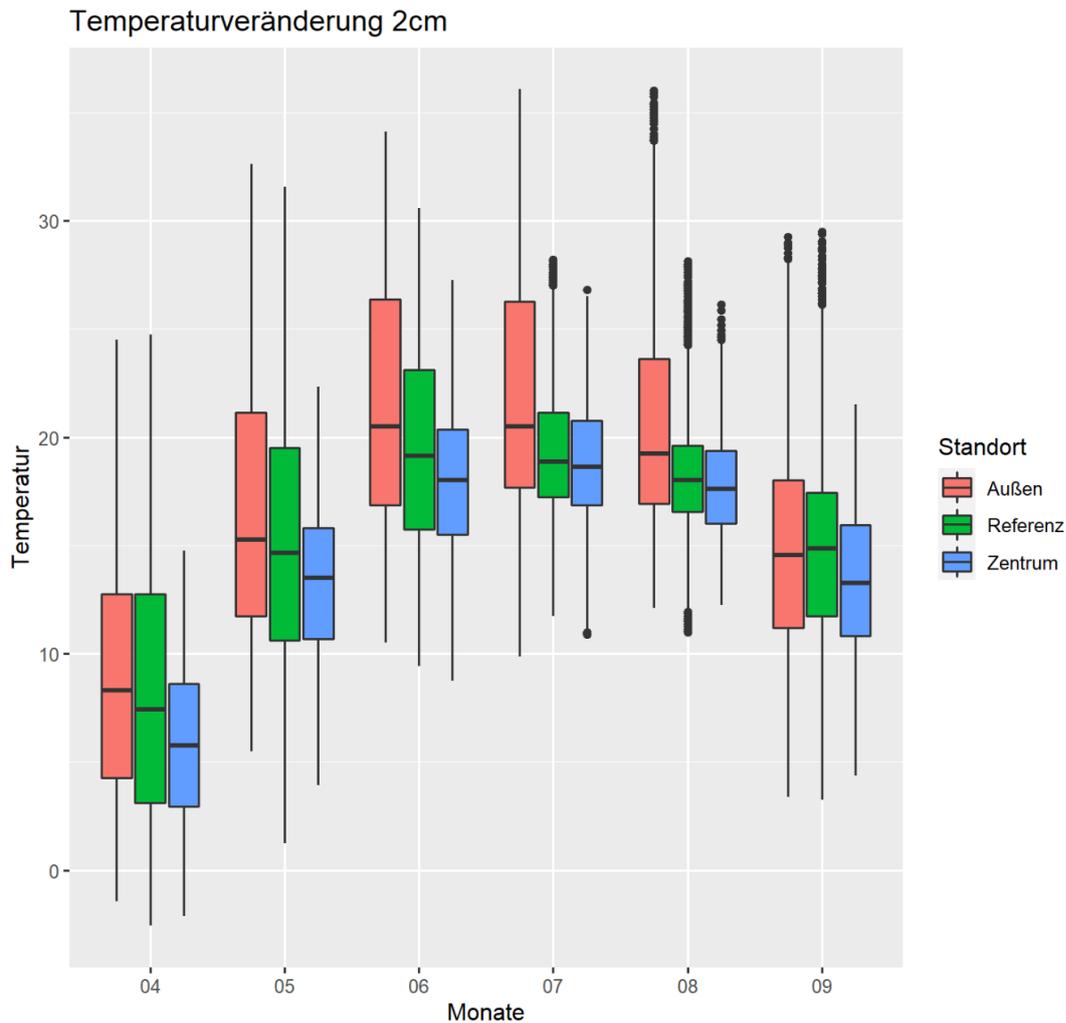


Abb. 33: Temperaturverlauf über Vegetationsperiode 2cm.

Auch die Daten in Höhe von 2cm folgen einer Normalverteilung, allerdings war auch bei diesen keine Varianzhomogenität gegeben. Es wurde ein Kruskal-Wallis Test durchgeführt, welcher ein hochsignifikantes Ergebnis zeigte. Die Alternativhypothese mit Ungleichheit der Gruppen wurde deshalb angenommen. Die Gruppen unterschieden sich statistisch signifikant.

In untenstehendem Boxplot wird die Bodentemperatur in 10cm Tiefe veranschaulicht. Hier wird ein Temperaturunterschied der Messpunkte am deutlichsten sichtbar. Im Vergleich zu den Grafiken der Messhöhen von 2 und 15cm ist hier der Unterschied zwischen den Messpunkten am höchsten. Der Vergleich des Septembers in allen drei Höhen zeigt einen ähnlichen Verlauf: Die Referenzfläche ist am wärmsten, gefolgt vom Messpunkt Außen und der geringsten Temperatur im Zentrum.

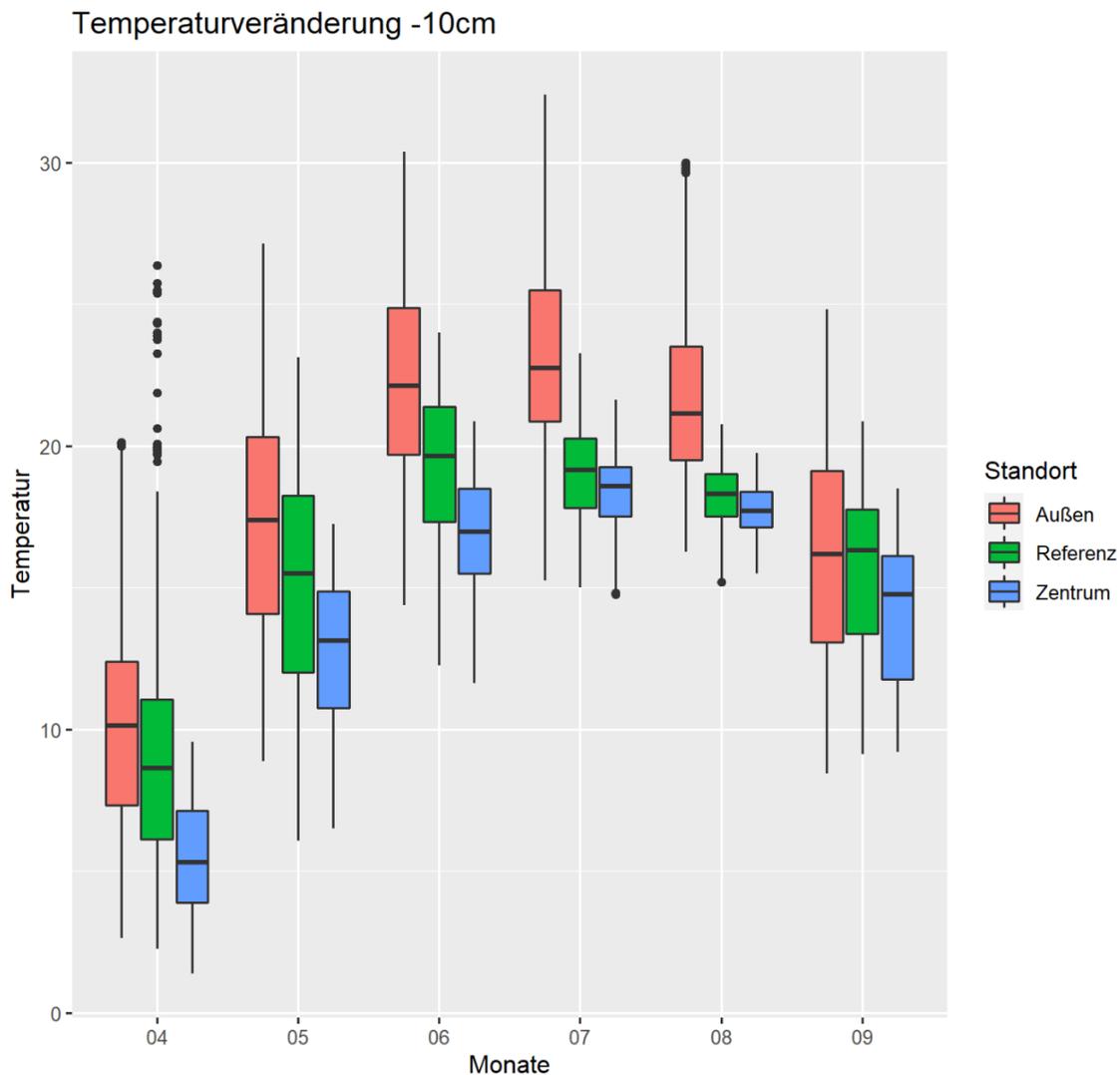


Abb. 34: Bodentemperaturverlauf über Vegetationsperiode -10cm.

In der Tiefe von 10cm wurden keine Minusgrade gemessen, die Minimumtemperaturen lagen im Zentrum bei 1,3°C, auf der Referenzfläche bei 2,2°C und Außen bei 2,6°C. Die Durchschnittstemperatur unterschied sich bei allen Standorten um jeweils zwei Grad und betrug im Zentrum 14,1°C, auf der Referenz 16,1°C und Außen 18,3°C. Die Maximaltemperatur unterschied sich zwischen dem Messpunkt Außen (32,3°C) und der Referenzfläche um 6°C (26,3°C), im Zentrum lag diese bei 25,2°C.

Die Daten wiesen keine Normalverteilung auf und wurden ebenfalls mithilfe des Kruskal-Wallis Test getestet. Auch dieses Ergebnis war signifikant und somit wurde die Alternativhypothese Ungleichheit der Mittelwerte angenommen.

### 5.1.6. Bodenfeuchtigkeit

Die Daten der Bodenfeuchtigkeit mussten mittels Faktor von 6591 umgerechnet werden, um die Einheit Volumsprozent (Vol%) zu erhalten. Es zeigte sich, dass bis

August der Messpunkt Außen am trockensten war, ab Juni war die Referenzfläche am feuchtesten. Die durchschnittliche Feuchtigkeit lag Außen bei 37,3%, im Zentrum bei 42,3% und auf der Referenz bei 42,7%

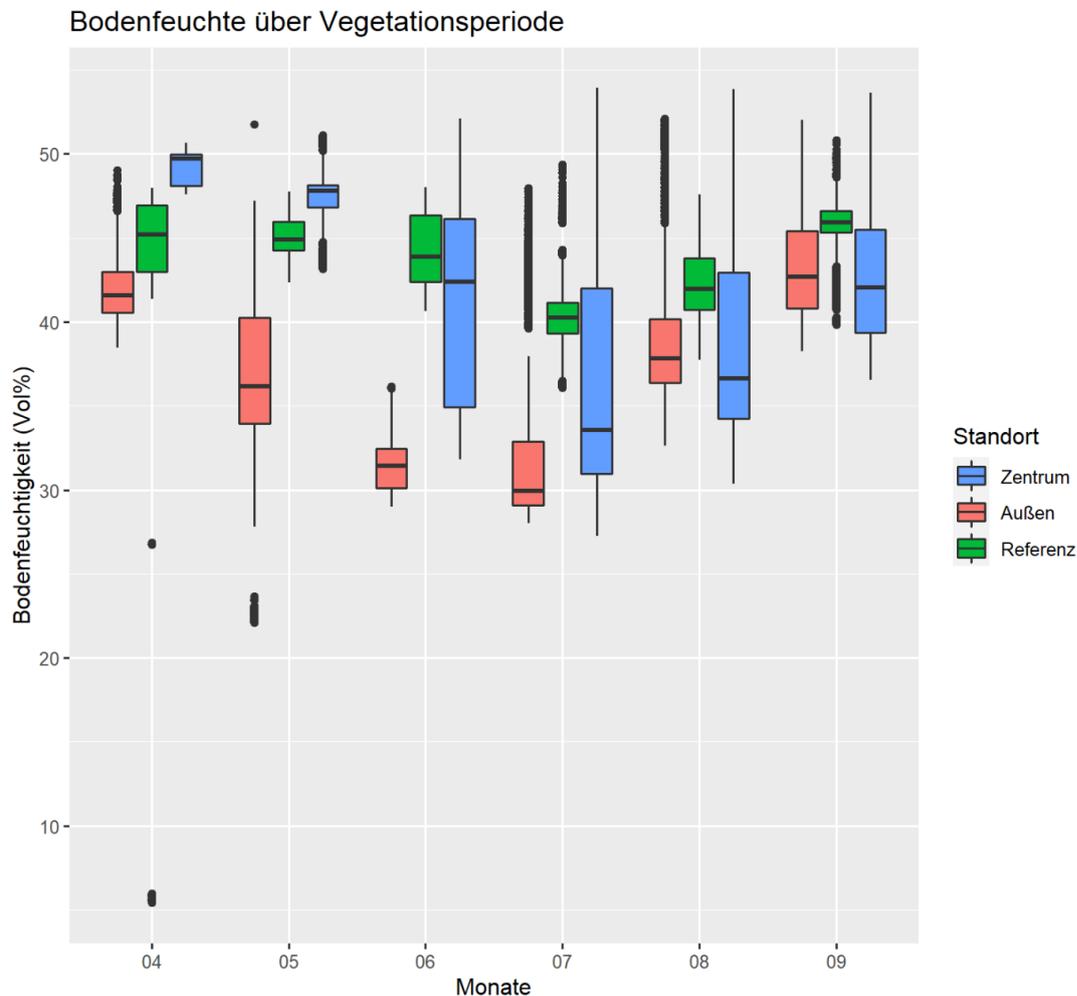


Abb. 35: Bodenfeuchtigkeitsverlauf über Vegetationsperiode.

Es wurde auf Normalverteilung der Daten getestet und mithilfe von Histogrammen überprüft. Die Daten sind nicht normalverteilt, daher wurde zur Testung der Gleichheit der Kruskal-Wallis Test durchgeführt. Da es sich um mehrere unabhängige Stichproben handelte wurde anschließend ein pairwise-wilcoxon Test durchgeführt. Auch bei diesen Daten war der Unterschied statistisch signifikant und die Alternativhypothese mit Ungleichheit der Daten wurde angenommen.

Die Betrachtung der Bodenfeuchte bei schönem Wetter, herangezogen wurde wieder der 19.07., zeigte, dass der Standort Außen am trockensten war, gefolgt vom Zentrum. Der Boden auf der Referenzfläche war am feuchtesten. Der 29.05., der als Beispiel für den bewölkten Tag herangezogen wurde, zeigte denselben Verlauf wie das obige Diagramm: am feuchtesten war das Zentrum, Außen war es am trockensten.

### 5.1.7. Optische Begutachtung

Die optische Begutachtung der Fläche zeigte im Juni auf der ganzen Fläche relativ einheitlichen Bewuchs, wobei die Referenzfläche dichter und stärker bewachsen war.

Im Juli wurden an der Seite der Module einige trockene Stellen beobachtet, unter den Modulen jedoch wuchs dichte, grüne Vegetation. Vorzufinden waren beispielsweise Weißklee, Löwenzahn und diverse Süß- und Sauergräser. Auf der Referenzfläche, die durch einen extra Zaun von den Schafen abgegrenzt war, wuchsen die Pflanzen stark, wie Abbildung 16 zeigt. Neben Gräsern begrünten auch die bereits gepflanzten Hecken und Sträucher den Zaun der Anlage, die ca. einen halben Meter hoch waren.



Abb. 36: Bewuchs der Solaranlage im Juli (Eigene Bilder).



Abb. 37: Bewuchs der Referenzfläche im Juli (Eigene Bilder).

## 6. Diskussion und Ausblick

Da der Ausbau von erneuerbaren Energien voranschreitet, ist es wichtig dieses Thema wissenschaftlich zu begleiten. Nicht nur in Hinblick auf neue Technologien, Wirtschaftlichkeit und Ressourcenschonung, sondern auch auf mögliche Auswirkungen auf Ökologie und Biodiversität. Diese Masterarbeit gilt als erster Schritt dies zu untersuchen. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, inwiefern das Mikroklima beeinflusst wird. Anhand dieser können Ableitungen getroffen werden und wenn nötig Maßnahmen gesetzt werden.

Der Markt und der Ausbau erneuerbarer Energien wird steigen, da die Klimaziele der EU erreicht werden sollen. Auch ein Grund dafür ist der steigende Preis von Strom und Gas aufgrund des Ukrainekriegs sowie der steigenden Nachfrage durch die Pandemie (Dolna-Gruber et al., 2022). Da der Markt für solarthermische Solaranlagen in den letzten Jahren aufgrund der geringen Preise vor allem für fossile Energieträger sank, ist nun aber wieder mit einer Marktsteigerung zu rechnen. Diese Annahme wird durch Fishedick (2022) untermauert, der die Krise in der Energieversorgung und in den Energiepreisen als Treiber für die Energiewende sieht. Aufgrund dieser Entwicklungen bietet sich ein großes Potenzial für Investitionen in erneuerbare Technologien, vor allem in Solarenergie. Rechtliche Rahmenbedingungen werden dazu von der EU ausgearbeitet, wünschenswert wäre dabei aber auch eine schnellere Umsetzung von Maßnahmen, da die Ziele doch relativ ambitioniert sind.

Bei der grafischen Aufbereitung der Daten der ZAMG wurde bereits erkennbar, dass eine Erwärmung in Friesach in den letzten Jahrzehnten stattgefunden hat. Dies spricht für den Ausbau erneuerbarer Energien und die Reduktion fossiler Brennstoffe, um die Klimaerwärmung einzudämmen. Auch die Erhöhung der Sonnenstundendauer kann ein Potenzial für die Nutzung von Solarenergie bedeuten, wobei dies über einen längeren Zeitraum betrachtet werden sollte.

Agri-PV dient als Beispiel für die Doppelnutzung von Energie und Landwirtschaft. Der Bau einer Freiflächen Solaranlage muss also nicht unbedingt Fläche versiegeln und steht nicht automatisch in Flächenkonkurrenz zur Landwirtschaft. Agri-PV wird meist mittels einer höher gestellten Anlage ausgeführt, wobei zu überlegen ist, ob der Bau der Anlage auf Stahlpfeilern ökonomisch rentabel ist. Eine tief gestellte Anlage, wie die Solarthermieanlage in Friesach kann ebenso landwirtschaftlich genutzt werden, extensiv in Form von einer Beweidung mit Schafen. Solarpaneele wirken in diesem Zusammenhang als Schattenspender für die Tiere.

Auf der Freiflächenanlage in Friesach wurde mittels Sensoren meteorologische Parameter während der Vegetationsperiode gemessen und anschließend ausgewertet. Mikroklimatische Messungen zeigten in der Literatur einen Unterschied in der Boden- und Lufttemperatur. Unter den Solarpaneelen war die Luft im Sommer kühler als auf der Referenzfläche (Armstrong et al., 2016). Diese Ergebnisse stimmen mit den eigenen Messungen nicht überein. Statistisch war der Unterschied in der

Lufttemperatur nicht signifikant. Der Mittelwert war auf der Referenzfläche um 0,11°C kühler. Es zeigte sich, dass die Lufttemperatur auf der Referenzfläche im Laufe des Sommers anstieg, auch war dies bei der Lufttemperatur unter den Paneelen der Fall. Die Lufttemperatur unterlag dabei tageszeitlichen Schwankungen.

Mikroklimatische Effekte werden grafisch in der Luftfeuchte erkennbar, diese war auf der Referenzfläche durchschnittlich feuchter als unter den Paneelen, mit Ausnahme der Monate April und September. Die Unterschiede sind statistisch allerdings nicht signifikant. Der Mittelwert unterschied sich zwischen Messpunkten nicht.

Der Tagesverlauf bei schönem Wetter am 19.07.2022 zeigt den entgegengesetzten Verlauf von Temperatur und Luftfeuchte, je höher die Temperatur desto geringer die Feuchtigkeit. Die Temperatur war nachts auf der Referenzfläche geringer als im Zentrum, die Luftfeuchte höher. Im Gegensatz dazu zeigt der 29.05.2022, an dem bewölktetes Wetter vorherrschte, stärkere Schwankungen in Lufttemperatur und Luftfeuchte. Es war feuchter und kälter, die Lufttemperatur und Luftfeuchte auf der Referenzfläche geringer, wobei dies auf die Tiefst- und Höchsttemperatur nicht zutraf. Der Unterschied zwischen Referenz und Zentrum war größer als bei schönem Wetter.

Der Wind auf der Fläche der Solarthermieanlage kam am häufigsten aus Osten und Westen. Die Lufttemperatur und Luftfeuchte der beiden Standorte wurden in Abhängigkeit der Windrichtung Süd-Ost und Nord-West betrachtet, wobei sich die Mittelwerte je nach Windrichtung und Standort um maximal 0,4°C unterschieden. Die Maximaltemperaturen waren bei südöstlichem Wind höher, die Minimaltemperaturen bei nordwestlichem Wind geringer. Die Spannweite bei südöstlichem Wind größer. Die Luftfeuchtigkeit war auf der Referenzfläche minimal höher als im Zentrum, ebenso war diese bei nordwestlichem Wind geringer. Das Maximum unterschied sich zwischen den Windrichtungen und den Standorten nicht.

Die Ergebnisse der Bodentemperatur unterschieden sich nicht von den Ergebnissen von PV-Freiflächenanlagen in der Literatur. Die Bodentemperatur war in der Studie von Makaronidou (2020) und Armstrong et al. (2016) unter PV-Modulen während der Vegetationsperiode kühler als auf der Referenzfläche. Dieses Ergebnis konnte auch mit den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen bestätigt werden. Wobei die Spannweite der Temperatur nach höherer Messhöhe weiter wurde. Die Bodentemperatur war an der Messstation Außen immer am höchsten, gefolgt von der Referenzfläche. Eine Ausnahme bildete hierbei jedoch der Messwert bei +15 cm. Von Juni bis August war die Bodentemperatur im Zentrum wärmer als auf der Referenzfläche. Ein Grund hierfür könnte sein, dass auf der Referenzfläche die Gräser relativ hoch wuchsen und dadurch die Beschattung erhöhten und der Luftaustausch geringer war als unter den Paneelen. Im Vergleich zu den Messhöhen in 2 cm und 15 cm Höhe wurde in einer Tiefe von -10 cm keine Minusgrade gemessen. Die Luftfeuchte sowie die Bodenfeuchte stiegen im August und September an, die Boden- und Lufttemperaturen sanken.

Im Gegensatz zu Armstrong et al. (2016) wurde keine Austrocknung der Fläche unterhalb der Paneele beobachtet oder gemessen. Nach Makaronidou (2020) und

Hassanpour Adeh (2018) ist der Boden unter den Modulen feuchter als auf der Referenzfläche. Dies war in Friesach nur im April und Mai der Fall. Am Beginn der Vegetationsperiode zeigte sich, dass die Bodenfeuchte am Messpunkt außen an den Modulen trockener war als auf der Referenzfläche und im Zentrum unter den Paneelen. Im August und September allerdings war der Boden im Zentrum am trockensten. Dies könnte mit dem Regen im August und September zusammenhängen, dem Regenabfluss von den Paneelen, der den Boden am Messpunkt außen feuchter werden ließ. Unterstützt wird diese Annahme von Armstrong et al. (2014). Ab dem Monat Juni war die Referenzfläche durchgehend am feuchtesten. Ebenso wie bei der Bodentemperatur in 15 cm Höhe könnte dafür die Vegetation verantwortlich sein. Die durchschnittliche und die minimal gemessene Bodenfeuchte unterschied sich zwischen Referenz und Zentrum allerdings nicht. Dennoch sind die Ergebnisse nach dem Kruskal-Wallis Test als signifikant anzusehen.

Die Globalstrahlung zeigt die natürlichen tageszeitlichen Schwankungen und es war kein Trend zu erkennen. Sieht man sich die Globalstrahlung verschiedener Tage an, ist sowohl der Sonnenaufgang als auch der Sonnenuntergang erkennbar. Ebenso werden wolkenlose und wolkenreiche Tage erkennbar. An letzteren war die Globalstrahlung geringer.

Die optische Begutachtung der Fläche zeigte, dass durch die Gräser und Kräuter auf der Referenzfläche eine höhere Pflanzenvielfalt vorzufinden war. Allerdings muss erwähnt werden, dass diese keiner Mahd unterzogen wurde und auf dieser auch keine Schafe weideten. Auswirkung des dichten Bewuchses spiegelte sich auch in den Messergebnissen wider. Der Unterschied der Bodentemperatur zwischen dem Messpunkt unter den Paneelen im Zentrum und der Referenzfläche wurde geringer, was auf die Beschattung zurückzuführen sein könnte.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Solarpaneele das Mikroklima beeinflussen, wobei der größte Unterschied der Messstationen im Bereich der Bodentemperatur gemessen wurde. Inwiefern diese Ergebnisse die Pflanzenbiomasse und die Biodiversität beeinflusst, kann in dieser Arbeit nicht beantwortet werden. Der Ausfall des ECH<sub>2</sub>O und des Hobo Dataloggers zeigt die Limitation von Messungen im Freiland. Durch diverse Einflüsse können Sensoren fehlerhafte Daten aufzeichnen oder gestört werden.

Die Literaturergebnisse, die sich auf den Lebensraumverlust beziehen, müssen jedoch kritisch hinterfragt werden. Die in dieser Arbeit untersuchte Fläche hat eine Größe von 5.750 m<sup>2</sup>, somit können Ergebnisse je nach Region und Anlagengröße variieren und sich unterscheiden. Aufgrund dessen können die Ergebnisse nicht verallgemeinert werden und gelten nicht gleichermaßen für alle Solaranlagen. Einige Autorinnen sehen Freiflächen Solarparks negativer als andere, wobei zu bedenken ist, dass einige Studien in den USA durchgeführt wurden und diese Flächen weitaus größer zu sein scheinen als in Europa bzw. Österreich. Das heißt nicht, dass nicht auch in kleineren Anlagen negative Auswirkungen möglich sind, diese aber bei kleineren Flächen leichter, durch beispielsweise das Anlegen von Biotopen, minimiert

werden können. Um einer Flächenversiegelung entgegenzuwirken, wäre eine extensive Nutzung dieser durchaus eine Möglichkeit. Ebenso kann mithilfe von Bepflanzung die Biodiversität gesteigert werden. Vorschläge dazu finden sich beispielsweise in der EAG-Investitionszuschüsseverordnung-Strom, in der genannte Maßnahmen die Errichtung von Nistplätzen und die Ansaat von regionalen Saatgutmischungen sind.

Weltweit sollen Solaranlagen wissenschaftlich betreut werden, um mögliche negative Konsequenzen für das Mikroklima, die Biodiversität, das Klima und die Umwelt zu verhindern und um Potenziale der Solarenergie bzw. -thermie zu erkennen und auszubauen. Die Ergebnisse dieser Arbeit können unterstützend sowohl für das Vegetationsmanagement als auch für Designoptimierungen herangezogen werden.

Bezogen auf den Standort Friesach können weitere Untersuchungen, aufgrund der dauerhaften Installation der Sensoren durch die Kelag Energie & Wärme GmbH durchgeführt werden. Dies wäre durchaus von Vorteil, um den Betrachtungszeitraum über die Vegetationsperiode hinaus zu erweitern. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit können nun auch folgend weitere Versuche in Hinblick auf das Pflanzenwachstum durchgeführt werden. Inwiefern die mikroklimatischen Unterschiede vor allem in der Bodentemperatur Auswirkungen auf das Ökosystem und die Saatgutauswahl haben, könnte Gegenstand zukünftiger wissenschaftlicher Arbeiten sein. Im Laufe dieses Jahres sollen diverse Saatgutmischungen angesät und wissenschaftlich untersucht werden. Dabei soll vor allem das Pflanzenwachstum, eventuelle Beeinträchtigungen der Pflanzen durch die Solarpaneele und die Biodiversität im Allgemeinen betrachtet werden. Es wäre denkbar, dass durch das Einbringen von vielfältigen Kräutermischungen sowie die aktive Umsetzung von Förderungsmaßnahmen für die Erhaltung von Flächen und den Lebensraum eine Aufwertung der Flächen möglich ist und diese eine Habitatsfunktion für diverse Organismen bietet. Die Begrünung des Zaunes wurde bereits durchgeführt und weitere Maßnahmen sind geplant. Die Beweidung mit Schafen ist für einen längeren Zeitraum vorgesehen

Für die zukünftige Forschung in Österreich wären interessante Fragestellungen, ob es Auswirkungen der Anlage über einen längeren Zeitraum am Feld und im nahen Umkreis gibt und wie sich diese äußern. Ebenso soll eine wissenschaftliche Betreuung bei zukünftigen Projekten gewährleistet werden. Um die Solarenergienutzung weiter auszubauen, sollen geeignete Standorte schnellstmöglich gefunden werden. Sozialwissenschaftlich untersucht werden könnten die Akzeptanz der Bevölkerung, die Zusammenarbeit mit BäuerInnen und dem Naturschutz sowie die Eingliederung in das Landschaftsbild. Forschung im Bereich der Agri-Photovoltaik wird an der Universität für Bodenkultur institutsübergreifend betrieben.

Die Anlage in Friesach dient als gutes Beispiel dafür, wie eine nachhaltige Wärmebereitstellung zukünftig aussehen kann.

## Literaturverzeichnis

Armstrong, A., Waldron, S., Whitaker, J. and Ostle, N. J., 2014. Wind farm and solar park effect on plant-soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology* (2014) 20, 1699-1706. <https://doi.org/10.1111/gcb.12437>.

Armstrong, A., Ostle, J. N. and Whitaker, J., 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters* (11), doi:10.1088/1748-9326/11/7/074016.

Beatty, B., Macknick, J., McCall, J., Braus, G. and Buckner, D., 2017. Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center. National Renewable Energy Laboratory.

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., Wittman, M., Wonisch, P. und Wopienka, E., 2021. Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2020 – Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Biesmeijer, K., van Kolschoten, L., Wit, F. and Moens, M., 2020. The effects of solar parks on plants and pollinators: the case of Shell Moerdijk. Naturalis Biodiversity Center.

Blum, U., Rosenthal, E. und Diekmann, B., 2020. Energie - Grundlagen für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26933-3>

BMNT, 2019. Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich, Periode 2021-2030.

BMNT, 2020. Energie in Österreich. Zahlen, Daten, Fakten. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Brauner, 2015. Die Energiewende in Europa: Technologische Herausforderungen an eine interdisziplinäre Energiestrategie. *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2015) 132/3, 180-184. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0294-5>.

Bundesamt für Strahlenschutz, 2019. Mehr Sonnenstunden erfordern mehr UV-Schutz. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BfS/DE/2019/013.html#:~:text=%22Durch%20den%20Klimawandel%20gibt%20es,davor%20ist%3A%20Starke%20Sonne%20meiden> Zugriff am: 14.07.2022.

Bundeskanzleramt, 2021. „Fit for 55“-Paket – EU-Kommission geht Herausforderungen zum Klimaschutz an. Verfügbar unter: <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/themen/europa-ak.tuell/fit-for-55-paket-eu->

[kommission-geht-herausforderungen-zum-klimaschutz-an.html](#) Zugriff am: 17.06.2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022. Eröffnungsbilanz Klimaschutz. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/01/20220111-habeck-legt-eröffnungsbilanz-klimaschutz-vor.html> Zugriff am: 20.09.2022.

Chock, R. Y., Clucas, B., Peterson, E. K., Blackwell, B. F., Blumstein, D. T., Church, K., Fernandez-Juricic, E., Francescoli, G., Greggor, A. L., Kemo, P., Pinho, G., M., Sanzenbacher, P. M., Schulte, B. A., und Toni, P., 2020. Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. Conservation Science and Practice, 2021 3 (2), 1-11. <https://doi.org/10.1111/csp2.319>

Christian, R., Kerschner, F. und Wagner, E. M., 2016. Rechtsrahmen für eine Energiewende Österreichs (REWÖ). Manz'sche Verlags- und Universitätsbuchhandlung GmbH: Wien.

Dermuth, B., Maack, A. und Schumacher, J., 2019. Photovoltaik-Freiflächenanlagen – Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.

Dolna-Gruber, C., Knaus, K. und Zwiebel, L., 2022. Stromgroßhandel – Preisentwicklung und wesentliche Einflussfaktoren. Analyse der Österreichischen Energieagentur im Auftrag von Österreichs Energie, Update und Ergänzung. Wien: Österreichische Energieagentur.

eBod - Digitale Bodenkarte, s.a. Verfügbar unter: <https://bodenkarte.at/#/center/14.41883,46.94297/zoom/16.4> Zugriff am: 15.06.2022.

Europäische Kommission, s.a. Renewable energy – directive, targets and rules. Verfügbar unter: [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules_en) (Zugriff am: 24.05.2022).

Europäisches Parlament, 2018. Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.

Eurostat, s.a. Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch. Verfügbar unter: [https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=t2020\\_rd330#:~:text=Der%20Bruttoendenergieverbrauch%20ist%20der%20Energieverbrauch,Energie%20aus%20erneuerbaren%20Quellen%20berechnet](https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/products-datasets/product?code=t2020_rd330#:~:text=Der%20Bruttoendenergieverbrauch%20ist%20der%20Energieverbrauch,Energie%20aus%20erneuerbaren%20Quellen%20berechnet) (Zugriff am: 17.05.2022).

Evangelisti, L., De Lieto Vollaro, R. und asdrubali, F., 2019. Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Reviews (114), 1-20.

Fechner, H., Rosner, M., Mayr, C., Rennhofer, M., Schneider, A. und Peharz, G., 2018. Technologie Roadmap Photovoltaik. Potenziale und Technologie –

Entwicklungsbedarf für Photovoltaik in den Sektoren Gewerbe/Industrie-Mobilität-Landwirtschaft-Gebäude/Städte. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

Fritz, B., Horvath, G., Hünig, R., Pereszlenyi, A., Egri, A., Guttmann, M., Schneider, M., Lemmer, U., Kriska, G. und Gomard, G., 2020. Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic insects. *Plos one* 15 (12), 1-22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>

Fischedick, M., 2022. Energieversorgungsrisiken, Energiepreiskrise und Klimaschutz erfordern gemeinsame Antworten. *Wirtschaftsdienst*, 102 (4), 262-269. <https://doi.org/10.1007/s10273-022-3163-y>

Günther, M., 2015. Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien – Möglichkeiten, Potenziale, Systeme. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Hassanpour Adeg, E., Selker, S. J., Higgins, C. W., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *Plos one* 13 (11), 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>

Haucap, J. und Meinhof, J., 2022. Die Strompreise der Zukunft. *Wirtschaftsdienst*, 2022, 102, 53-60. <http://doi.org/10.1007/s10273-022-2175-7>.

Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Marsical, M. L., Maestre, F.T., Tavassoli, M., Allen, E. B., Barrows, C. W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S. and Allen, M. F., 2014. Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (29), 766-779. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>

Kaltschmitt, M. und Streicher, W., 2009. Regenerative Energien in Österreich - Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Kaltschmitt, M., Streicher, W. und Wiese, A., 2020. Erneuerbare Energien. Systemtechnik - Wirtschaftlichkeit – Umweltaspekte, 6. überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

Krautzer, B., 2021. Gumpensteiner Photovoltaikmischung Universal. Persönliche Mitteilung, 14.07.2022.

Lora-alliance, s.a. Whats is LoRaWAN Specification. Verfügbar unter: <https://loralliance.org/about-lorawan/> Zugriff am: 05.07.2022.

Maia, A. S. C., de Andrade Culhari, E., de Franca Carvalho Fonseca, V., Milan, H., F., M. and Gebremedhin, K. G., 2020. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. *Journal of Cleaner Production* 258 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120551>

Nestroy, O., Aust, G., Blum, W. E. H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W. und Wagner, J., 2011. Systematische Gliederung der Böden Österreichs. Wien: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft.

Österreichische Energieagentur, 2022. Energiepreisindex. Verfügbar unter: <https://www.energyagency.at/fakten/energiepreisindex> Zugriff am: 12.09.2022.

Österreichs E-Wirtschaft, 2022. Energiestatus Österreich: Verantwortung mit Weitblick. Verfügbar unter: <https://oesterreichsenergie.at/downloads/publikationsdatenbank/detailseite/energiestatus-oesterreich-verantwortung-mit-weitblick> Zugriff am: 12.09.2022.

Projektbericht, 2021. Projektbericht der Solarthermieanlage in Friesach.

Schabbach, T. und Leibbrandt, P., 2020. Solarthermie – Wie Sonne zu Wärme wird. Berlin: Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-59488-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59488-9_7)

Schindele, S., 2021. Feldfrüchte und Strom von Agrarflächen: Was ist Agri-Photovoltaik und was kann sie leisten? GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society (30), 87-95. <https://doi.org/10.14512/gaia.30.2.6>

Stadtgemeinde Friesach, s.a. Über die Gemeinde. Zahlen, Daten, Fakten. Verfügbar unter: <https://friesach.gv.at/ueber-die-gemeinde> Zugriff am 05.06.2022.

Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer, U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, S. und Vollprecht, J., 2022. Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende - Ein Leitfaden für Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.

Umweltbundesamt, s.a. Erneuerbare Energie. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/energie/erneuerbare-energie> (Zugriff am: 24.05.2022).

Wesselak, V. und Voswinckel, S., 2016. Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird, 2. Auflage. Berlin: Springer.

Watter, H., 2019. Regenerative Energiessysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme, 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23488-1>

Weiss, W. und Spörk-Dür, M., 2020. Solar Heat Worldwide-Global Market Development and Trends in 2019. Institute for Sustainable Technologies & International Energy Agency.

Wirth, H., 2022. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer ISE.

Zmarsly, E., Kuttler, W. und Pethe, H., 2007. Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen, 3. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.