

Potenzialabschätzungen für Agri-PV in der Schweizer Landwirtschaft



<https://doi.org/10.21256/zhaw-2649>

Autoren	<p>Dionis Anderegg, ZHAW, dionis.anderegg@zhaw.ch Mareike Jäger, ZHAW, mareike.jaeger@zhaw.ch Sven Strebel, ZHAW, sven.strebel@zhaw.ch Jürg Rohrer, ZHAW, juerg.rohrer@zhaw.ch</p> <p>Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Grüentalstrasse 11 8820 Wädenswil</p>
Datum	25.01.2024
Disclaimer	Die in dieser Publikation veröffentlichten Forschungsarbeiten wurden mit Unterstützung des Schweizerischen Bundesamtes für Energie im Rahmen des SWEET-Konsortiums EDGE durchgeführt. Die Autorinnen und Autoren tragen die alleinige Verantwortung für die in dieser Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen.
Zitiervorschlag	Anderegg, D., Jäger, M., Strebel, S., Rohrer, J. (2024). Potenzialabschätzungen für Agri-PV in der Schweizer Landwirtschaft. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen. https://doi.org/10.21256/zhaw-2649
Titelbild	Titelbild: Ackerbohnen/Hafer-Mischkultur unter Photovoltaik Modulen. Foto: Mareike Jäger, Juli 2023

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Begriffe und Abkürzungen	6
1 Einleitung	7
2 Methoden	8
2.1 Identifikation geeigneter landwirtschaftlicher Nutzflächen.....	8
2.1.1 Nähe zu Bauzonen:	8
2.1.2 Landwirtschaftliche Nutzflächen (LN) und Eignung für Agri-PV:.....	8
2.1.3 Einstrahlungsverhältnisse:.....	9
2.1.4 Ausschlusskriterien:.....	9
2.2 Berechnung des theoretischen PV-Potenzials	9
3 Resultate	12
3.1 Theoretisches Gesamtpotenzial der Agri-PV	12
3.2 Theoretisches Potenzial pro Bewirtschaftungsstatus und Kultur	12
3.3 Geografische Verteilung des theoretischen Potenzials	14
3.4 Einfluss der Ausschlusskriterien	15
3.5 Identifikation von Flächen mit hoher Einstrahlung und hohem Ertrag	17
3.6 Stromgestehungskosten	18
4 Diskussion	20
4.1 Theoretisches Potenzial höher als bisher angenommen.....	20
4.2 Nähe zum Stromnetz	20
4.3 Puffer um Bauzonen	21
5 Literatur	22
Anhang	23

Zusammenfassung

Unter Agri-Photovoltaik (Agri-PV) wird die Doppelnutzung von Flächen für landwirtschaftliche Zwecke sowie die Energieproduktion mit Photovoltaik verstanden. Da sich Agri-PV-Anlagen typischerweise ausserhalb der Bauzonen befinden, werden Bewilligungen zu deren Bau nur erteilt, wenn sie standortgebunden sind (sich unter anderem in wenig empfindlichen Gebieten befinden) und Vorteile für die landwirtschaftliche Produktion erbringen bzw. der wissenschaftlichen Forschung dienen.

Die vorliegende Untersuchung quantifiziert das Potenzial zur Stromproduktion von Agri-PV in der Schweiz unter Berücksichtigung der vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzflächen. Es werden nur Flächen berücksichtigt, die sich in einem Puffer von 1000 m um Bauzonen befinden. Flächen, die sich mit nationalen Schutzinteressen überschneiden, werden ausgeschlossen. Dies gilt auch für Sömmerungs- und Biodiversitätsförderflächen sowie für Flächen mit einer horizontalen Einstrahlung unter 1000 kWh/m²/a. Die verbleibenden Flächen werden anschliessend anhand der darauf angebauten Kultur in die drei Kulturgruppen «Offene Ackerflächen», «Dauerkulturen» und «Dauergrünland» eingeteilt. Pro Kulturgruppe wird eine typische Agri-PV Referenzanlage definiert und deren Stromertrag berechnet.

Aufgrund fehlender praktischer Erfahrungen in der Schweiz bezüglich des Nutzens von Agri-PV für die landwirtschaftliche Produktion wurden nur wenige Einschränkungen bezüglich der Art der Kulturen gemacht, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Kombination mit PV-Anlagen angebaut werden können. Das berechnete Potenzial stellt daher ein theoretisches Maximalpotenzial dar, während das praktische Potenzial deutlich geringer sein kann. Die Auswirkungen auf die Landwirtschaft sollten in den nächsten Jahren durch entsprechende Forschung in der Schweiz nachgewiesen werden.

Für Agri-PV in der Schweiz wurde ein theoretisches Gesamtpotenzial von 323 TWh/a berechnet. Das Potenzial verteilt sich über eine Fläche von 583'499 ha und umfasst damit 56 % der im Jahr 2022 vorhandenen landwirtschaftlichen Nutzflächen (ohne Sömmerungsflächen) in der Schweiz. Wird eine Distanz von maximal 300 m zu einem Einspeisepunkt für den Strom berücksichtigt, so reduziert sich das theoretische Potenzial auf 113 TWh pro Jahr (204'029 ha). Der grösste Teil des Potenzials mit maximal 300 m Distanz vom Einspeisepunkt liegt auf offenen Ackerflächen mit 92.2 TWh/a. Im Dauergrünland beträgt dieses Potenzial 17.8 TWh/a, bei den Dauerkulturen sind es 3 TWh/a. Bei Dauerkulturen haben Flächen mit Rebbau den grössten Anteil am Potenzial, gefolgt von Obstplantagen (Äpfel, Steinobst, Birnen). Die geografische Verteilung zeigt eine Konzentration der Potenziale auf das Mittelland, insbesondere in den Kantonen Bern, Waadt und Freiburg.

Der durchschnittliche spezifische Jahresertrag beträgt 1194 kWh/kWp. Im Winterhalbjahr wird durchschnittlich 29 % des Jahresertrages produziert. Der durchschnittliche spezifische Winterstromertrag der Agri-PV liegt somit etwa um einen Drittel höher als der durchschnittliche spezifische Winterstromertrag von PV-Anlagen auf Dachflächen.

Agri-PV Anlagen sind nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung zu PV-Anlagen auf Dachflächen und auf anderen bestehenden Infrastrukturen zu sehen. Aufgrund der höheren spezifischen Produktion im Winter und der Synergieeffekte mit der landwirtschaftlichen Produktion erscheinen Agri-PV-Anlagen als sinnvolle Erweiterung.

Für 1 MWp Referenzanlagen wurden ausserdem die Stromgestehungskosten berechnet. Dabei wurden die Investitions- und Betriebskosten (inkl. Netzanschluss), ein kalkulatorischer Zins von 2 %, sowie Förderbeiträge der GREIV im Jahr 2022 berücksichtigt. Die Gestehungskosten liegen für Anlagen im Dauergrünland aufgrund der einfachen Anlagenkonstruktion mit 6.0 Rp./kWh am tiefsten. Auf Ackerkulturen ist mit 7.8 Rp./kWh zu rechnen, bei Dauerkulturen mit 8.4 Rp./kWh. Insbesondere die aufwändigere Konstruktion erhöht bei Anlagen über Acker- und Dauerkulturen die Investitionskosten, womit höhere Gestehungskosten einhergehen.

Bei einer angenommenen jährlichen Stromproduktion von 7 bis 8 TWh durch Agri-PV (entspricht ca. 10% des erwarteten Strombedarfs im Jahr 2050) wären je nach gewählten Kulturen 1 bis 2 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz betroffen. Diese Flächen wären keineswegs verloren, sondern könnten weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden und zusätzlich von den Synergien der Agri-PV profitieren.

Begriffe und Abkürzungen

Agri-PV	Kombinierte Landnutzung, die landwirtschaftliche Produktion und Photovoltaik-Infrastruktur auf derselben Fläche ansiedelt
GWh	Gigawattstunde
kWh	Kilowattstunde
kWh/kWp	Spezifischer Ertrag (pro Jahr oder Winterhalbjahr), welcher auf die Nennleistung der PV-Module unter standardisierten Testbedingungen normiert wurde.
kWp	Kilowatt-Peak. Angabe der Nennleistung von PV-Anlagen unter standardisierten Testbedingungen.
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche, gemäss LBV ohne Sömmerungsfläche
PV	Photovoltaik
RPV	Raumplanungsverordnung
Sommerhalbjahr	Zeitperiode vom 01. April bis 30. September
TWh	Terrawattstunden
Winterhalbjahr	Zeitperiode vom 01. Januar bis 31. März & 01. Oktober bis 31. Dezember
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

1 Einleitung

Unter Agri-PV wird die Doppelnutzung von Flächen für landwirtschaftliche Zwecke sowie die Energieproduktion mit Photovoltaik verstanden (Jäger et al., 2022). Sie unterscheidet sich klar von PV-Freiflächenanlagen, bei denen die Fläche hauptsächlich oder vollständig für die Energieproduktion genutzt wird. Da sich Agri-PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen befinden, werden Ausnahmegewilligungen zu deren Bau nur erteilt, falls eine Standortgebundenheit nachgewiesen werden kann. Gemäss Artikel 32c der Raumplanungsverordnung (RPV) gelten Agri-PV Anlagen dann als standortgebunden, wenn sie sich in wenig empfindlichen Gebieten befinden und Vorteile für die landwirtschaftliche Produktion bewirken oder entsprechenden Versuchs- und Forschungszwecken dienen. Für Fruchtfolgeflächen gelten besondere Auflagen. So muss man nachweisen, dass die Erträge infolge der Agri-PV Nutzung nicht sinken. Zu beachten ist, dass Fruchtfolgefläche ein rein raumplanungsrechtlicher Begriff ist und sich nicht zwangsläufig nur auf Ackerflächen bezieht. In einigen Kantonen befinden sich auch viele Dauerkulturlächen auf Fruchtfolgeflächen. Vor kurzem sind im Rahmen der parlamentarischen Debatten zum Mantelerlass mit dem neuen Art. 24b E-RPG Grundlagen im eidgenössischen Raumplanungsgesetz mit Auswirkungen auf die Bewilligungsvoraussetzungen von PV-Anlagen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen geschaffen worden. Am 29.09.2023 haben National- und Ständerat den Mantelerlass in der Schlussabstimmung angenommen. Die Frist für das fakultative Referendum ist aber noch nicht abgelaufen. Damit wäre die Agri-PV nicht nur auf Verordnungs- sondern auch auf Gesetzesebene, zumindest im Grundsatz, geregelt worden.

Im Jahr 2022 veröffentlichte die ZHAW eine Machbarkeitsstudie zum Thema Agri-PV in der Schweizer Landwirtschaft (Jäger et al., 2022). Diese beinhaltet unter anderem eine Abschätzung des Ertragspotenzials, welche das jährliche Potenzial für Agri-PV in der Schweiz mit 132 TWh/a bezifferte. Dabei wurden die Vorgaben aus Artikel 32c der RPV berücksichtigt, indem landwirtschaftliche Nutzflächen (LN) in einem 1000 m Puffer um Bauzonen selektiert und nationale Schutzgebiete ausgeschlossen wurden. Damit sollte dem Aspekt der «wenig empfindlichen Gebiete» Rechnung getragen werden.

Genauere Datenquellen für die Einstrahlung haben inzwischen ein deutlich höheres theoretisches Ertragspotenzial für die Agri-PV in der Schweiz ergeben. Der vorliegende Bericht soll dieses Potenzial quantifizieren und damit die Resultate der Machbarkeitsstudie aktualisieren. Die in der Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (2022) angewendete Methodik wird dazu in den folgenden Punkten leicht angepasst:

- Aktualisierung der Einstrahlungs-Datenquelle:
Es wird mit der typischen horizontalen Einstrahlung in Monats- und Jahresauflösung, basierend auf Meteonorm (Version 8) gerechnet. In der Machbarkeitsstudie wurde auf ein GIS-Tool (Solar Radiation Tool von ArcGIS Pro) zurückgegriffen, welches bei einem Vergleich mit realen Messdaten zu tiefe Einstrahlungsprognosen zeigt.
- Es erfolgt eine Anpassung der für Agri-PV geeigneten landwirtschaftlichen Kulturen.
- Ein mittlerweile aktualisierter Datensatz zu landwirtschaftlichen Nutzflächen aus dem Jahr 2023 wird herangezogen.

Neben der Aktualisierung des jährlichen Potenzials zur Stromerzeugung werden genauere Angaben zum Winterstromertrag der Agri-PV gemacht. Ausserdem wird der Einfluss der berücksichtigten nationalen Schutzkriterien in der zugrundeliegenden räumlichen Analyse genauer beleuchtet sowie die geografische Verteilung des Ertragspotenzials aufgezeigt.

Aufgrund fehlender praktischer Erfahrungen in der Schweiz bezüglich des Nutzens der Photovoltaik für die landwirtschaftliche Produktion wurden nur wenige Einschränkungen bezüglich der Art der Kulturen gemacht, die auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Kombination mit PV-Anlagen angebaut werden können. Das berechnete Potenzial stellt daher ein theoretisches Maximalpotenzial dar, während das praktische Potenzial deutlich geringer sein kann. Die Auswirkungen auf die Landwirtschaft sollten in den nächsten Jahren durch entsprechende Forschung nachgewiesen werden.

2 Methoden

Nachfolgend werden die Methoden zur Berechnung des theoretischen Potenzials der Agri-PV in der Schweiz beschrieben. Sie stützen sich weitgehend auf eine Agri-PV Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (2022), welche von der ZHAW erstellt wurde.

2.1 Identifikation geeigneter landwirtschaftlicher Nutzflächen

Die Selektion von potenziell für Agri-PV geeigneten Flächen erfolgte unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien:

2.1.1 Nähe zu Bauzonen:

Die berücksichtigten Flächen befinden sich in der Nähe von Bauzonen (Berücksichtigung «wenig empfindlicher Gebiete» aus der RPV). Dazu wurde ein 1000 m breiter Puffer um Bauzonen gelegt (Abbildung 1). Im Kapitel 4.3 wird aufgezeigt, wie sich das Potenzial mit anderen Puffergrössen verändert.

Kommt es zu einer räumlichen Überschneidung von Landwirtschaftlichen Nutzflächen (LN) und dem Puffer um Bauzonen, wird lediglich der Teil der LN berücksichtigt, der sich innerhalb des Puffers befindet. Das Resultat dieses Vorgehens ist in Abbildung 1 anhand eines Kartenausschnitts visualisiert. Die Bauzone ist in rot dargestellt, der Puffer um Bauzonen blau. Die auf den Puffer zugeschnittenen LN für Agri-PV sind gelb eingefärbt.

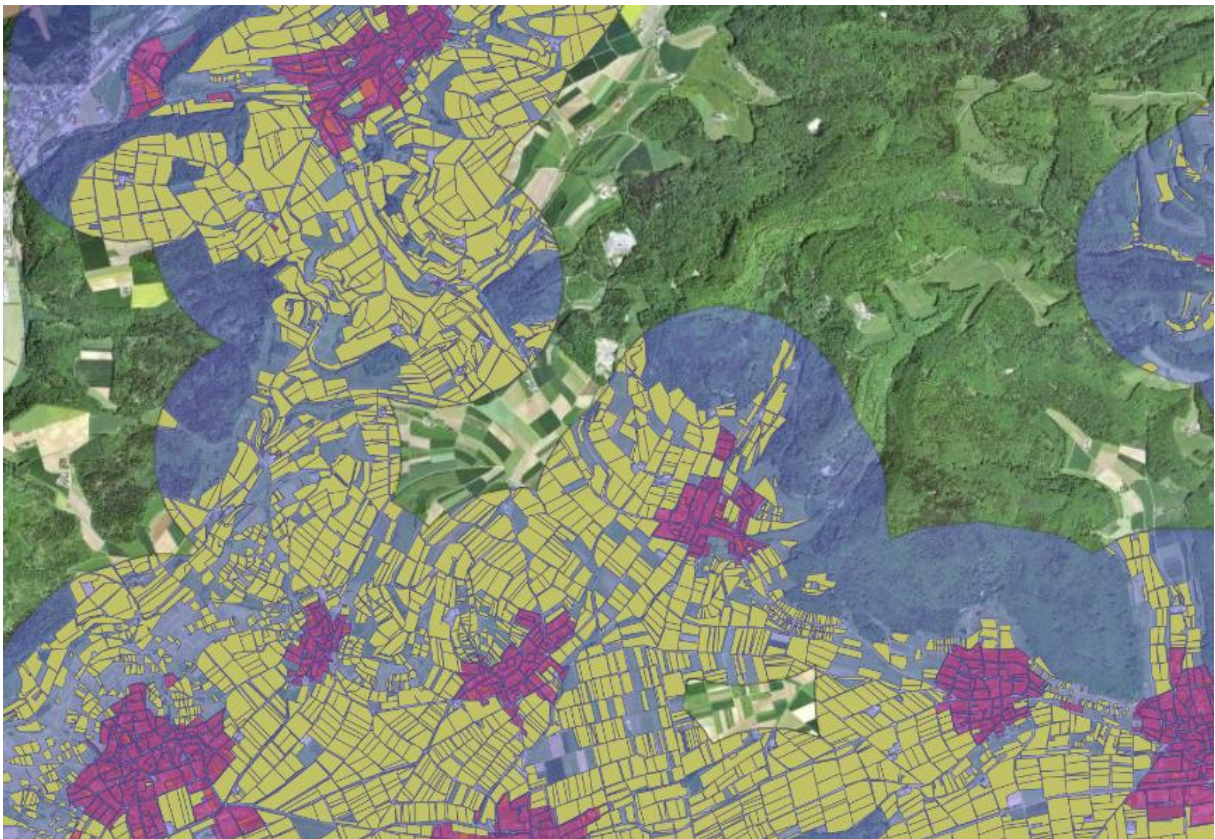


Abbildung 1: Kartenausschnitt mit Bauzonen (rot), 1000 m Puffer um Bauzonen (blau) und LN für die Agri-PV (gelb). In das theoretische Potenzial fliessen nur (Teil-) Flächen ein, die sich im Puffer befinden.

2.1.2 Landwirtschaftliche Nutzflächen (LN) und Eignung für Agri-PV:

LN innerhalb des 1000 m Puffers um Bauzonen wurden selektiert. Die LN basieren auf dem Modell «Landwirtschaftliche Kulturlflächen Identifikator 153» (BLW, 2023) und wurden anhand der darauf angebauten Kultur einem Bewirtschaftungsstatus zugeordnet. Diese sind «Offene Ackerflächen», «Dauergrünland», «Dauerkultur», «geschützter Anbau», «Sömmerungsflächen» und «Biodiversitätsflächen (BFF)».

Sämtliche Flächen, welche als BFF oder Sömmerungsflächen eingestuft sind, werden nicht in die Potenzialberechnung einbezogen. Sömmerungsflächen zählen gemäss landwirtschaftlicher Begriffsverordnung nicht zur LN und Biodiversitätsförderflächen dürfen gemäss Direktzahlungsverordnung nicht mit Photovoltaikmodulen ausgestattet werden.

Gleiches gilt für einige Spezialfälle wie z.B. Hochstamm-Obstgärten, welche für die Agri-PV als nicht geeignet betrachtet werden. Die Zuordnung der verschiedenen LN zum jeweiligen Bewirtschaftungsstatus und deren Berücksichtigung zur Berechnung des PV-Potenzials kann im Detail der Tabelle 7 im Anhang entnommen werden.

2.1.3 Einstrahlungsverhältnisse:

Anschliessend werden potenzielle Flächen für Agri-PV ausgeschlossen, welche eine horizontale jährliche Globalstrahlung < 1000 kWh/m² aufweisen. Im Kapitel 3.4 wird aufgezeigt, welchen Einfluss die Wahl eines anderen Grenzwertes bei der Einstrahlung auf das theoretische Potenzial der Agri-PV hätte. Als Datenquelle für die Einstrahlung wird ein Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 100 m verwendet. Dieser beinhaltet die Einstrahlung in einem typischen meteorologischen Jahr pro Monat oder einem ganzen Jahr und wurde mit Meteororm Version 8 generiert (Meteotest, 2022). Darin ist der Fernhorizont berücksichtigt. Im Gegensatz dazu wurde die Einstrahlung in der Analyse von Jäger et al. (2022) unter Berücksichtigung des Fernhorizonts mittels digitalem Höhenmodell mit dem Solar Radiation Toolset von ArcGIS Pro berechnet. Ein Vergleich dieser beiden Einstrahlungs-Datenquellen mit Messtationen der MeteoSchweiz im Kanton Zürich zeigte, dass die Einstrahlung mit dem Solar Radiation Toolset von ArcGIS Pro jährlich um 9 bis 12 % unterschätzt wurde. Im Winterhalbjahr wurde die Einstrahlung gar um 20 bis 30 % unterschätzt. Die typische Einstrahlung aus dem Rasterdatensatz mit Meteororm Version 8 (Meteotest, 2022) zeigt mit Abweichungen von 1 bis 2 % eine sehr hohe Übereinstimmung mit den Messtationen.

2.1.4 Ausschlusskriterien:

Abschliessend wurden Ausschlusskriterien basierend auf übergeordneten nationalen Schutzinteressen definiert und darin befindliche Flächen ausgeschlossen. Damit wird ebenfalls der Aspekt «wenig empfindliches Gebiet» aus der RPV berücksichtigt, indem der Agri-PV gegenüberstehende Schutzinteressen reduziert werden. Die berücksichtigten Schutzkriterien sind:

- Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN)
- RAMSAR und SMARAGD Naturschutzgebiete
- Naturpärke
- Moore (Hoch- und Flachmoore)
- Amphibienschutzgebiete
- Nationalpark
- Biosphärenreservate
- UNESCO-Welterbe Naturstätten
- Trockenwiesen und -weiden
- Gewässerschutzzonen S1 bis S3

Speziell zu erwähnen ist, dass die Raumplanungsverordnung (RPV) lediglich möglichst geringe gegenüberstehende Schutzinteressen für die Agri-PV fordert. Dies bedeutet, dass z.B. Flächen in BLN-Gebieten nicht zwangsläufig ausgeschlossen sein müssten (Jäger & Anderegg, 2023).

2.2 **Berechnung des theoretischen PV-Potenzials**

Die PV-Ertragsberechnung für geeignete Flächen gemäss Kapitel 2.1 basiert auf der Einstrahlung und der Fläche am jeweiligen Standort sowie dem für den Bewirtschaftungsstatus geeigneten Anlagentyp. In der Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (2022) wurde pro Bewirtschaftungsstatus ein geeigneter Anlagentyp definiert. Anschliessend wurde pro Anlagentyp eine Ertragssimulation am Referenzstandort Kloten (ZH) durchgeführt, wo die typische Einstrahlung mit der mittleren Einstrahlung im Mittelland übereinstimmt. Nachfolgend sind die gewählten Anlagentypen pro Kulturgruppe kurz beschrieben.

Für offene Ackerflächen (z.B. Kartoffeln oder Weizen) wurden überdachte PV-Anlagen mit bifazialen Modulen und weiten Reihenabständen (rund Dreifaches der Modultischbreite) eingesetzt. Die Simulation basiert auf einem festen Neigungswinkel der Module von 20° sowie einer Ausrichtung von 30° Südwest (vgl. Abbildung 2). Dadurch wird eine möglichst homogene Einstrahlungsverteilung auf der darunter liegenden Kultur erreicht (Trommsdorff et al., 2021) und die maschinelle Bewirtschaftung der Acker-

fläche ist aufgrund der Montagehöhe und der weiten Stützenabstände weiterhin möglich (Jäger et al., 2022).



Abbildung 2: Anlagenbeispiel für Bewirtschaftungsstatus "Offene Ackerkultur". Agri-PV-Versuchsanlage (APV Resola) mit festinstallierten Modulen in Heggelbach (Deutschland). Die Module sind auf einer Höhe von 5.5 m installiert und der Stützenabstand in der Längsrichtung beträgt 19 m (Hofgemeinschaft Heggelbach, o. J.).

Im Dauergrünland (Naturwiesen oder Weiden) wird von zwei übereinander liegenden bifazialen Modulen im Querformat ausgegangen, die vertikal in Ost-West-Ausrichtung montiert werden (vgl. Abbildung 3). Die Modulunterkante bereits in Deutschland eingesetzter Systeme befindet sich ca. 0.8 m ab Boden, die Gesamthöhe des Systems beträgt damit rund 3 m. Durch die Montagehöhe wird eine Verschattung der PV-Module durch die landwirtschaftliche Nutzung minimiert und der Grünstreifen unterhalb der Module lässt sich einfach pflegen.



Abbildung 3: Anlagenbeispiel für den Bewirtschaftungsstatus "Dauergrünland". Vertikale APV-Anlage von Next2Sun in Donaueschingen (Deutschland). Die bifazialen Module sind vertikal aufgeständert, Ausrichtung der Modulflächen nach Osten bzw. Westen, Reihenabstand 10 m (Next2Sun, 2020).

Im Bereich der **Dauerkulturen** (z.B. Reben oder Obstplantagen) erfolgte die Ertragsberechnung der Referenzanlage mit bifazialen, semitransparenten Modulen, welche eine Lichtdurchlässigkeit von 50 % aufweisen. Die Lichtdurchlässigkeit von Modulen muss unter Berücksichtigung der angebauten Dauerkultur gewählt werden und kann sich projektspezifisch von der Referenzanlage unterscheiden. Es wurde eine Modulneigung von 12° und eine Ausrichtung von 30° Südwest angenommen (siehe Abbildung 4). Die Reihenabstände sind aufgrund der Lichtdurchlässigkeit und den Anforderungen an den Kulturschutz wesentlich kleiner als bei offenen Ackerflächen.



Abbildung 4: Anlagenbeispiel für Bewirtschaftungsstatus "Dauerkulturen" und «geschützter Anbau». Agri-PV-Anlage über einer Obstplantage in Gelsdorf (DE). Mit der APV-Anlage (links im Bild) konnten bestehende Kulturschutzmassnahmen (rechts im Bild) substituiert werden (Energie-Experten, o. J.).

Die pro Hektar installierbare PV-Nennleistung, sowie die typischen spezifischen Jahres- und Flächenenerträge für den Referenzstandort in Kloten ZH werden aus Jäger et al. (2022) übernommen und sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Der jährliche PV-Ertrag pro APV-Fläche (E_{APV}) wird anschliessend unter Verwendung der horizontalen Einstrahlung ($E_{horizontal}$) vor Ort in einem typischen meteorologischen Jahr (Meteotest, 2022) und der Einstrahlung am Referenzstandort Zürich Kloten (E_{Ref}) skaliert. Zusätzlich wird der Flächenenertrag des zugehörigen Bewirtschaftungsstatus aus Tabelle 1 (E_{Fl}) sowie die Bodenfläche (A) gemäss Formel (1) einbezogen. Die Referenz-Einstrahlung für den Flächenenertrag aus Tabelle 1 beträgt 1163 kWh/m²/a.

$$E_{APV} = \frac{E_{horizontal}}{E_{Ref}} * E_{Fl} * A \quad (1)$$

Tabelle 1: Annahmen zur Ertragsberechnung von Agri-PV Anlagen mit bifazialen Modulen analog Jäger et al. (2022). Berechnet für einen Referenzstandort in Zürich Kloten mit einer horizontalen Globalstrahlung von 1163 kWh/m²/a.

Bewirtschaftungsstatus	Nennleistung in MWp/ha	Typischer Jahresertrag in MWh/MWp	Flächenenertrag E_{Fl} in MWh/ha/a
Offene Ackerflächen	0.612	1200	735
Dauergrünland	0.293	1000	293
Dauerkulturen	0.737	1170	862

Auf die Verwendung von ein- oder zweiachsig nachgeführten Anlagen wird verzichtet. Der mögliche Flächenenertrag ist somit als konservative Einschätzung zu interpretieren und könnte durch ein Modultracking um ca. 15 % erhöht werden (Jäger et al., 2022).

3 Resultate

3.1 Theoretisches Gesamtpotenzial der Agri-PV

Die Identifikation potenziell geeigneter LN ergibt ein Flächenpotenzial von 583'499 ha (56 % der im Jahr 2022 vorhandenen LN ohne Sömmerungsflächen in der Schweiz). Unter Anwendung der beschriebenen Berechnungsmethoden beträgt die maximal installierbare Nennleistung von Agri-PV Anlagen in der Schweiz 271 GWp. Diese führen zu einem potenziellen Stromertrag von 323.3 TWh/a und damit zu einem durchschnittlichen spezifischen Jahresertrag von 1194 kWh/kWp. Damit ist das theoretische Potenzial für Agri-PV um mehr als den Faktor 6 höher als die gesamte Stromproduktion der Schweiz im Jahr 2022 (BFE, 2023). Der hohe Jahresertrag der Agri-PV ist unter anderem mit dem Einsatz von bifazialen Modulen und dem Anlagendesign (angenommene Ausrichtung und Neigung sowie geringe gegenseitige Verschattung durch grosse Reihenabstände) zu erklären.

Im Winterhalbjahr würden im Mittel 29.2 % der Erträge von Agri-PV Anlagen anfallen, was 94.6 TWh entspricht oder einem spezifischen Winterertrag von 349 kWh/kWp. Im Vergleich dazu liefern Anlagen auf Dachflächen mit einem jährlichen Durchschnittsertrag von rund 970 kWh/kWp (Hostettler, 2020; Hostettler & Hekler, 2021, 2022, 2023) und 27 % Winterstromanteil (Bucher & Schwarz, 2021) einen durchschnittlichen spezifischen Winterstromertrag von 262 kWh/kWp. Somit ist der spezifische Winterstromertrag der Agri-PV durchschnittlich 33 % höher als der spezifische Winterstromertrag von Dachflächen. Die Ursache für diesen hohen Winterstromertrag ist primär der hohe spezifische Jahresertrag von durchschnittlich 1194 kWh/kWp in Kombination mit einem leicht höheren Winterstromanteil.

3.2 Theoretisches Potenzial pro Bewirtschaftungsstatus und Kultur

Den grössten Beitrag zum theoretischen Potenzial liefern LN mit dem Bewirtschaftungsstatus «offene Ackerflächen» mit 225 TWh/a, gefolgt vom Dauergrünland mit 85 TWh/a und Dauerkulturen mit 13 TWh/a. Tabelle 2 und Abbildung 5 schlüsseln das Potenzial pro Bewirtschaftungsstatus auf. Der Tabelle 2 können ausserdem die relevantesten Kulturen entnommen werden.

Tabelle 2: Theoretisches Potenzial der Agri-PV in der Schweiz unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien mit Aufteilung nach Bewirtschaftungsstatus und Kulturen (kursiv). Es sind die Kulturen mit dem höchsten Potenzial gezeigt, die restlichen wurden unter «Andere» zusammengefasst. WH = Winterhalbjahr vom Jan-Mär und Okt-Dez.

Nutzung	Potenzial in TWh/a	Potenzial in TWh/WH	Winterstrom- anteil in %
Offene Ackerflächen	225.3	66.9	29.7
... <i>Kunstwiesen</i>	64.4	19.2	29.9
... <i>Winterweizen (ohne Futterweizen)</i>	42.6	12.6	29.6
... <i>Silo- und Grünmais</i>	26.4	7.8	29.6
... <i>Wintergerste</i>	15.4	4.6	29.6
... <i>Winterraps zur Speiseölgewinnung</i>	14.5	4.3	29.6
... <i>Körnermais</i>	10.6	3.1	29.5
... <i>Andere offene Ackerflächen</i>	51.4	15.2	29.6
Dauergrünland	84.6	23.7	28.0
... <i>Dauerwiesen (ohne Weiden)</i>	68.8	19.3	28.0
... <i>Weiden</i>	15.7	4.4	27.8
... <i>Übrige Grünflächen</i>	0.2	0.0	27.2
Dauerkultur	13.4	4.1	30.7
... <i>Reben</i>	5.8	1.2	31.6
... <i>Obstanlagen (Äpfel)</i>	3.1	0.9	30.1
... <i>Obstanlagen (Steinobst)</i>	1.3	0.4	29.4
... <i>Obstanlagen (Birnen)</i>	0.6	0.2	30.1
... <i>Andere Dauerkulturen</i>	2.3	0.6	30.1
Total	323.3	94.6	29.2

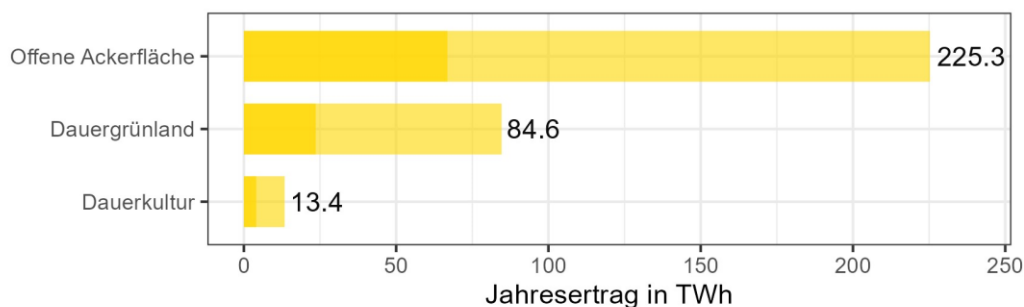


Abbildung 5: Theoretisches Potenzial von Agri-PV in der Schweiz pro Bewirtschaftungsstatus unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien inkl. Berücksichtigung von Flächen mit Anbau von Mais. Das Potenzial im Winterhalbjahr ist dunkel dargestellt, das Potenzial im Sommerhalbjahr hell.

Das Potenzial auf Ackerflächen wird von Kunstwiesen dominiert, gefolgt von Flächen mit Anbau von Winterweizen sowie Silo- und Grünmais. Kunstwiesen sind angesäte Mischungen, v.a. bestehend aus Gras und Kleearten, die zu Futterzwecken auf Ackerflächen angebaut werden. Aufgrund der Fruchtfolge variiert die pro Nutzfläche angebaute Kultur bei offenen Ackerflächen im Verlauf der Zeit. Die Aufteilung zeigt grob auf, mit welcher Häufigkeit Kulturen im Ackerbau der Schweiz vorkommen.

Der Maisanbau (inkl. Körnermais) trägt 37 TWh/a zum Potenzial bei (11.4 % des Gesamtpotenzials), ist aufgrund seiner geringen Schattentoleranz für die Doppelnutzung mit Agri-PV aber wenig geeignet (Jäger et al., 2022; Jäger & Anderegg, 2023). Werden Flächen mit Maisanbau vom Potenzial der Agri-PV abgezogen, verbleibt ein Potenzial von 286 TWh/a.

Im Dauergrünland zeigen Dauerwiesen (ohne Weiden) das grösste Potenzial von 69 TWh/a. Bei den Dauerkulturen zeigen Flächen mit Rebbau sowie verschiedene Obstkulturen das grösste Potenzial (Abbildung 6).

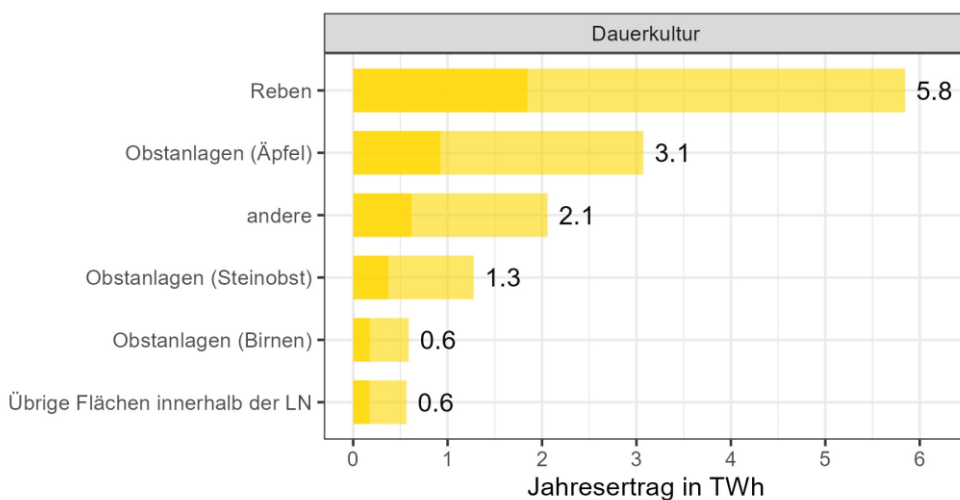


Abbildung 6: Theoretisches Potenzial von Agri-PV über Dauerkulturen in der Schweiz unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien. Die grössten Potenziale von Dauerkulturen liegen bei Reben und bei Obstanlagen. Kulturen mit einem Beitrag < 0.5 TWh/a wurden unter «andere» zusammengefasst. Das Potenzial im Winterhalbjahr ist dunkel dargestellt, das Potenzial im Sommerhalbjahr hell.

3.3 Geografische Verteilung des theoretischen Potenzials

Die geografische Verteilung des theoretisch jährlichen Ertragspotenzials von Agri-PV Anlagen ist in Abbildung 7 gezeigt. Es zeigt sich eine Konzentration des Potenzials auf der Alpennordseite im Mittelland.

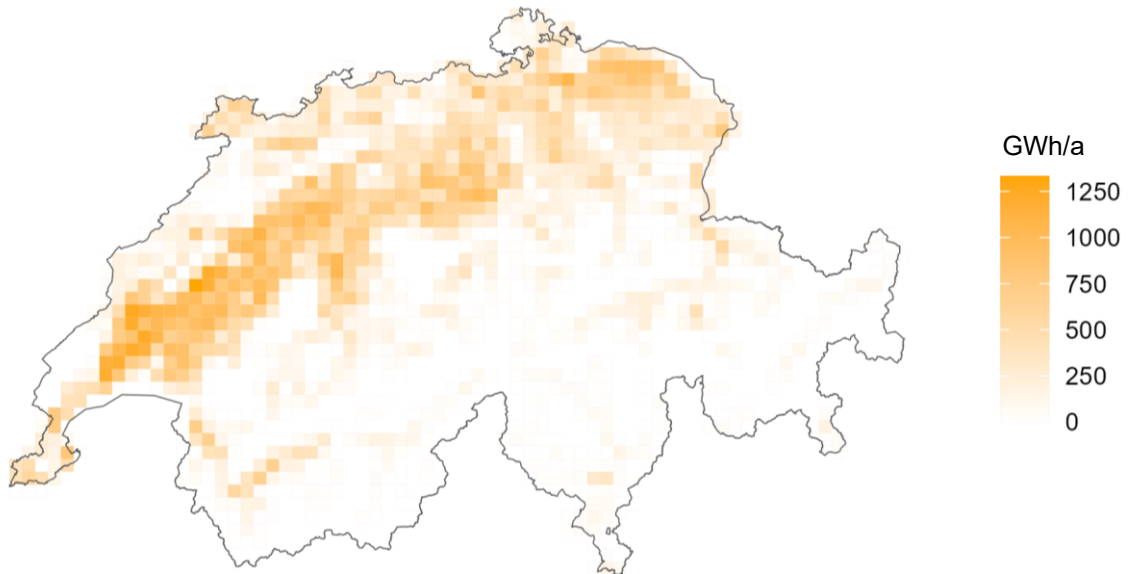


Abbildung 7: Geografische Verteilung des theoretischen Potenzials in GWh/a für Agri-PV unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, inkl. Flächen mit Anbau von Mais. Das Potenzial wurde in einem Raster mit einer Zellgrösse von 5 km x 5 km summiert. Der grösste Anteil am Potenzial liegt im Mittelland.

Das höchste Potenzial von 60 TWh/a besteht im Kanton Bern. Die Westschweizer Kantone Vaud (50 TWh/a) und Fribourg (34 TWh/a) zeigen ebenfalls ein sehr hohes Potenzial. Die Potenziale pro Kanton sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Theoretisches Potenzial der Agri-PV pro Kanton unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, inkl. Flächen mit Anbau von Mais. Gezeigt sind Kantone mit einem Potenzial > 5 TWh/a, die vollständige Liste kann der Tabelle 8 im Anhang entnommen werden. WH = Winterhalbjahr (Jan-Mär und Okt-Dez).

Kanton	Potenzial in TWh/a	Anteil am Gesamtpotenzial in %	Potenzial in TWh/WH
Bern	59.6	18.4	17.7
Waadt	50.2	15.5	15.1
Freiburg	34.4	10.6	10.3
Zürich	25.9	8.0	7.4
Luzern	21.6	6.7	6.3
Aargau	21.1	6.5	6.0
Thurgau	20.4	6.3	5.7
St.Gallen	16.9	5.2	4.8
Solothurn	10.2	3.2	2.9
Wallis	9.4	2.9	2.9
Graubünden	9.4	2.9	2.9
Jura	9.4	2.9	2.7
Basel-Landschaft	6.1	1.9	1.7
Genf	5.1	1.6	1.5

3.4 Einfluss der Ausschlusskriterien

Die angewendeten Ausschlusskriterien reduzieren das theoretische jährliche Ertragspotenzial der Agri-PV um Total 81.2 TWh/a. Den grössten Einfluss haben dabei die Naturpärke (26.6 TWh/a) und die BLN-Gebiete (20.8 TWh/a). Daneben führen Gewässerschutzgebiete (S1 bis S3) zu einer Potenzialreduktion von 11.3 TWh/a. Alle anderen Ausschlusskriterien reduzieren das Potenzial der Agri-PV jeweils um weniger als 1 %. Bei diversen Flächen mit einem Jahrespotenzial von insgesamt 16.8 TWh/a sind mehrere Ausschlusskriterien vorhanden, weshalb auf eine Zuweisung zu einem spezifischen Ausschlusskriterium verzichtet wurde. Der Einfluss der Ausschlusskriterien ist grafisch in Abbildung 8 gezeigt.

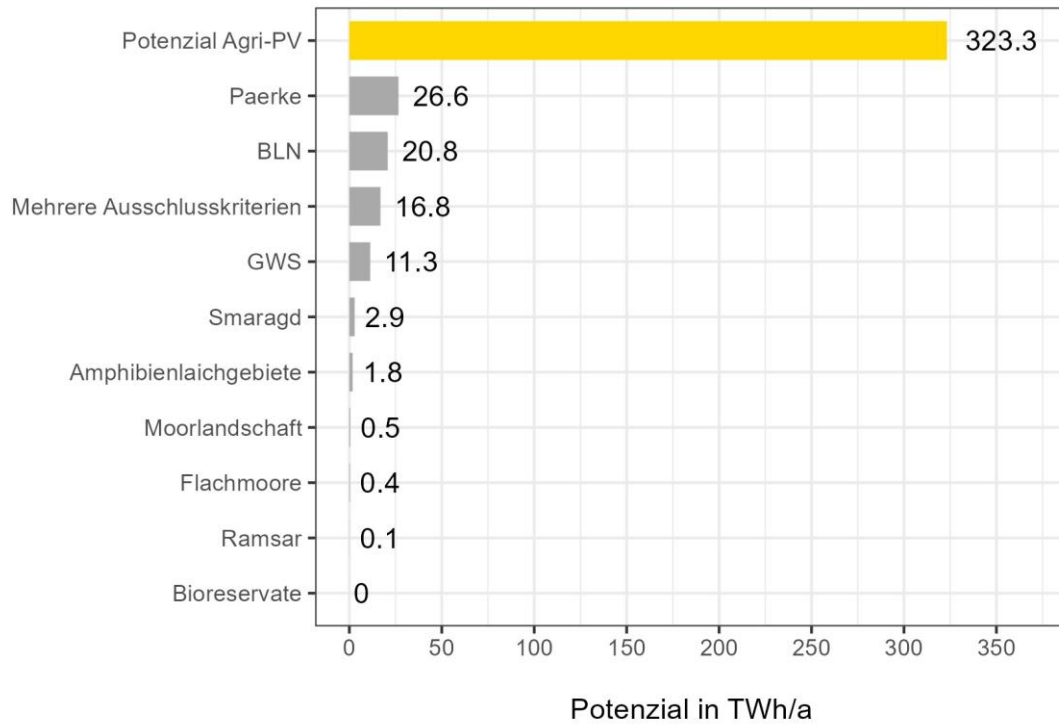


Abbildung 8: Einfluss der angewendeten Ausschlusskriterien auf das Ertragspotenzial der Agri-PV. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien verbleibt ein Potenzial von 323.3 TWh/a. Den grössten Einfluss auf das Potenzial haben Naturpärke und BLN-Gebiete. Flächen mit mehr als einem Ausschlusskriterium sind unter «Mehrere Ausschlusskriterien» zusammengefasst.

Die geografische Verteilung der Potenzialreduktion durch die Ausschlusskriterien kann der Abbildung 9 entnommen werden.

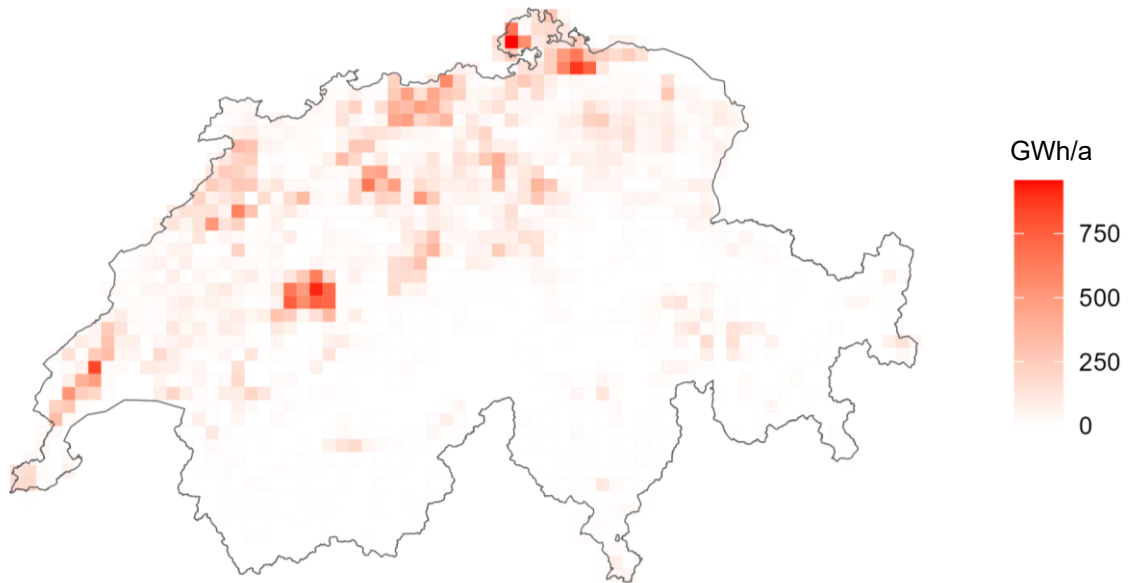


Abbildung 9: Räumliche Verteilung des aufgrund der definierten Ausschlusskriterien ausgeschlossenen Ertragspotenzials von Agri-PV Anlagen in der Schweiz in GWh/a.

Die mittlere Einstrahlung auf die für Agri-PV geeigneten Flächen beträgt 1234 kWh/m²/a mit einer Standardabweichung von 93 kWh/m²/a. Durch den Ausschluss von Flächen mit einer Einstrahlung < 1000 kWh/m²/a findet lediglich eine minimale Reduktion des Potenzials statt (Abbildung 10).

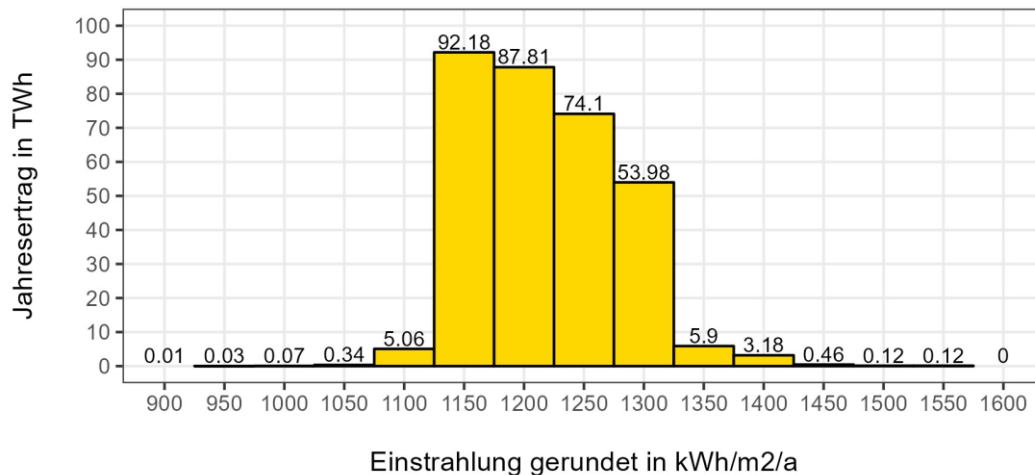


Abbildung 10: Verteilung des Ertragspotenzials der Agri-PV gruppiert nach der horizontalen Einstrahlung auf die Bodenfläche. Es wurden Klassen mit einer Bandbreite von 50 kWh/m²/a gebildet. Mittelwert 1234 kWh/m²/a, Median 1222 kWh/m²/a, Standardabweichung 93 kWh/m²/a.

Abbildung 10 zeigt die Verteilung des Ertragspotenzials nach Einstrahlungsklassen. Die grössten Beiträge zum Potenzial liefern Flächen mit einer Einstrahlung zwischen 1125 kWh/m²/a und 1325 kWh/m²/a (Säulen bei 1150 bis 1300 kWh/m²/a). Aus Abbildung 10 kann ausserdem entnommen werden, welchen Einfluss ein anderer Grenzwert bei der Einstrahlung auf das Potenzial der Agri-PV in der Schweiz hätte. Zum Beispiel ein Grenzwert von 1125 kWh/m²/a hätte eine Reduktion des Potenzials um 5.5 TWh/a zur Folge.

3.5 Identifikation von Flächen mit hoher Einstrahlung und hohem Ertrag

Die Flächen mit den höchsten horizontalen Einstrahlungen konzentrieren sich auf die südliche Schweiz. So verteilen sich zum Beispiel Flächen mit horizontalen Einstrahlungen $> 1325 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (Klassen 1350 bis $1600 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ aus Abbildung 10) geografisch auf die Kantone Wallis, Graubünden und Tessin (Abbildung 11). In der Genferseeregion sind zum Beispiel viele Flächen mit Einstrahlungen zwischen 1275 und $1325 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ vorhanden.

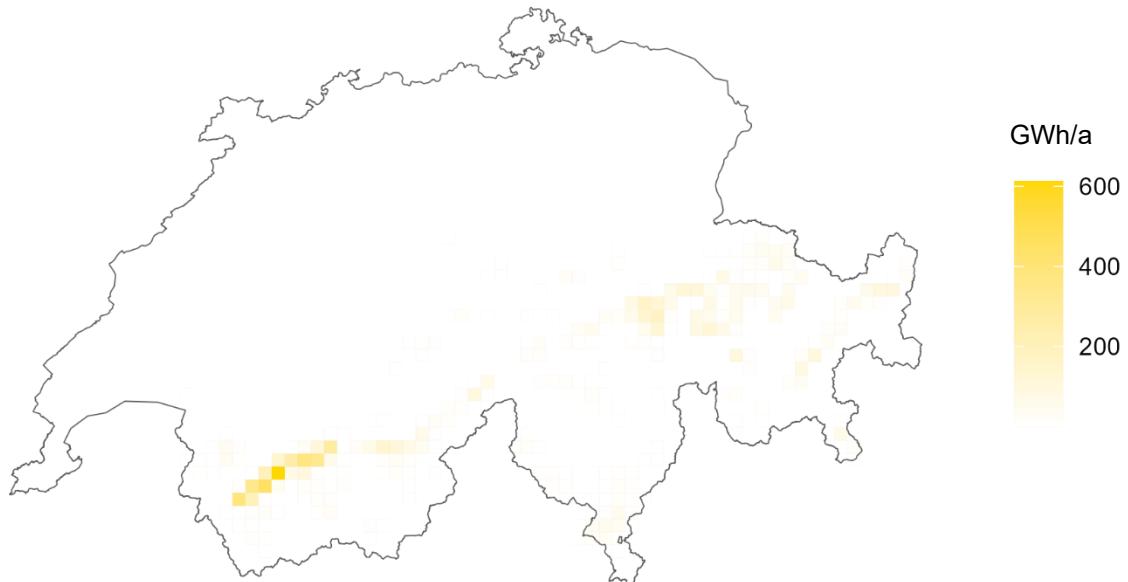


Abbildung 11: Geografische Verteilung des Ertragspotenzials von Agri-PV-Anlagen in der Schweiz mit sehr hoher horizontaler Einstrahlung ($> 1325 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$). Die Flächen konzentrieren sich auf die südliche Schweiz mit Fokus auf die Kantone Wallis und Graubünden.

Der spezifische Jahresertrag der Flächen für Agri-PV hängt neben der regional unterschiedlichen Einstrahlung (vgl. Abbildung 10) stark von der Kulturgruppe und dem dafür geeigneten Anlagentyp (Kapitel 2.2) ab. Der grösste Anteil am Potenzial im Dauergrünland hat einen spezifischen Jahresertrag von 1000 bis 1100 kWh/kWp . Dieser wird mit senkrechten bifazialen Anlagen in Ost-West-Ausrichtung erreicht. Dagegen liegt der spezifische Jahresertrag von bifazialen Agri-PV-Anlagen über Dauerkulturen, zwischen 1150 und 1450 kWh/kWp . Hochaufgeständerte PV-Anlagen über offenen Ackerflächen lassen spezifische Jahreserträge in der Grössenordnung von 1200 bis 1350 kWh/kWp erwarten. Abbildung 12 zeigt das nach dem spezifischen Jahresertrag kategorisierte Potenzial pro Kulturgruppe grafisch.

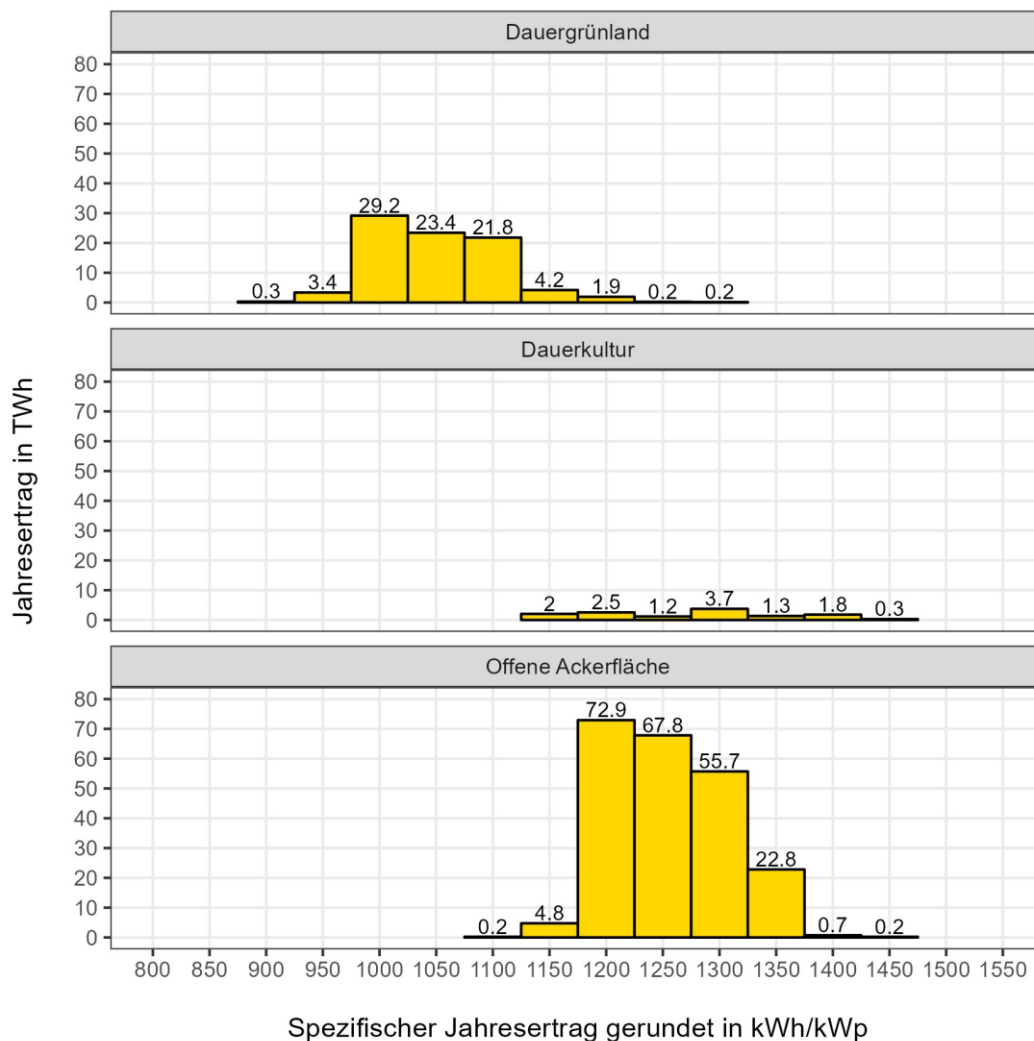


Abbildung 12: Verteilung des Ertragspotenzials der Agri-PV gruppiert nach dem spezifischen Jahresertrag der Anlagen. Es wurden Klassen mit einer Bandbreite von 50 kWh/kWp gebildet.

3.6 Stromgestehungskosten

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft (Jäger et al., 2022) wurden die Gestehungskosten für Strom aus der Agri-PV ermittelt. Diese beinhalten die Investitions- und Betriebskosten sowie Fördergelder durch die grosse Einmalvergütung (GREIV) für die im Kapitel 2.2 gezeigten Referenzanlagen mit einer Nennleistung von 1 MWp.

In den Investitionskosten sind neben Material, Projektierung und Installation auch typische Kosten für den Ausbau der Netzinfrastruktur mit einer Leitungslänge von 250 m enthalten. Die Betriebskosten beinhalten den einmaligen Ersatz der Wechselrichter, das Anlagenmanagement (Überwachung, Kontrollgänge etc.), den Unterhalt und Versicherungen. Ausserdem wird der minimale Verlust an landwirtschaftlicher Fläche durch die Konstruktion mittels typischer Pachtzinsen einbezogen. Eine Zusammenstellung der Investitions- und Betriebskosten kann der Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Kostenstruktur von Agri-PV-Anlagen pro Bewirtschaftungsstatus nach Jäger et al. (2022).

	Dauergrünland	Offene Ackerfläche	Dauerkulturen
Investitionskosten in CHF/kWp	779	1419	1546
Netzanschlusskosten in CHF/kWp	272.5	272.5	272.5
Betriebskosten in CHF/kWp/a	17.3	16.5	15.9
<i>(Betriebskosten in Rp./kWh)</i>	<i>(1.73)</i>	<i>(1.38)</i>	<i>(1.36)</i>

Die Wirtschaftlichkeit wurde in Jäger et al. (2022) mit einer Laufzeit von 30 Jahren, einem kalkulatorischen Zins von 2 % pro Jahr und einer linearen Degradation der Modulleistung auf 85 % der Ausgangsleistung nach 25 Jahren berechnet. Die Fördergelder wurden für eine Inbetriebnahme im Januar 2022 berechnet und orientieren sich an den entsprechenden Fördersätzen der Einmalvergütung für grosse Photovoltaikanlagen (GREIV).

Für die Referenzanlagen ergeben sich damit Stromgestehungskosten von 6.0 Rp./kWh bei vertikalen Anlagen im Dauergrünland, 7.8 Rp./kWh bei Anlagen über Ackerflächen und 8.4 Rp./kWh für Anlagen, die Dauerkulturen überdachen. Die Unterschiede in den Gestehungskosten sind primär auf die wesentlich höheren Investitionskosten von überdachten Anlagen gegenüber vertikal aufgeständerten Anlagen zurückzuführen, welche aufgrund der Trag- und Unterkonstruktion der Anlagen sowie höhere Modulkosten zustande kommen. Ein Teil dieser Mehrkosten gegenüber Anlagen im Dauergrünland kann mit höheren spezifischen Erträgen kompensiert werden, sodass die Stromgestehungskosten bei Ackerkulturen 30 % höher sind als im Dauergrünland und bei Dauerkulturen 40 % höher als im Dauergrünland.

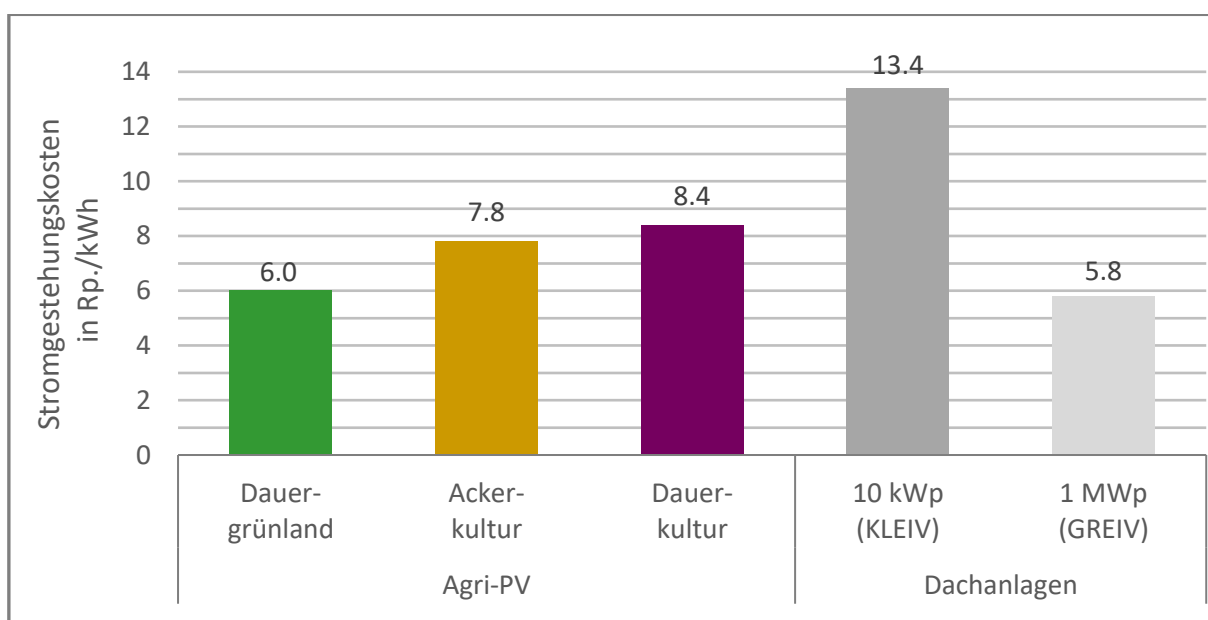


Abbildung 13: Gestehungskosten von Agri-PV Referenzanlagen am Standort Kloten ZH mit einer Nennleistung von 1 MWp. Als Vergleich sind typische Gestehungskosten für PV-Dachanlagen mit 10 kWp und 1 MWp gezeigt. Berücksichtigt sind Investitionskosten (inkl. Netzanschluss), Betriebskosten, ein kalkulatorischer Zins von 2 %, sowie die Förderbeiträge der GREIV im Jahr 2022.

Im Vergleich zu einer typischen Anlage auf Dachflächen (vgl. Abbildung 13) mit einer Nennleistung von 10 kWp sind die Gestehungskosten der Agri-PV wesentlich tiefer, was mit Skaleneffekten (Grösse der Agri-PV Referenzanlage) zu begründen ist. Bei grossen Anlagen auf Dachflächen (Referenzanlage mit 1 MWp) sind aber tiefere Gestehungskosten zu erwarten als bei der Agri-PV.

4 Diskussion

4.1 Theoretisches Potenzial höher als bisher angenommen

In der Machbarkeitsstudie von Jäger et al. (2022) wurde das theoretische Potenzial der Agri-PV in der Schweizer Landwirtschaft mit 132 TWh/a beziffert. Im vorliegenden Bericht wird das theoretische Potenzial mit 323 TWh/a um den Faktor 2.4 höher quantifiziert. Der Hauptgrund für diese grosse Abweichung ist die Verwendung einer genaueren Datenquelle für die Einstrahlung. In der Machbarkeitsstudie wurde das Solar Radiation Tool in ArcGIS Pro verwendet. Die vorliegende Untersuchung stützt sich dagegen auf Einstrahlungswerte in einem typischen meteorologischen Jahr aus in einem hochaufgelösten Raster (100 m Maschenweite) von Meteonorm (Meteotest, 2022). Ein Vergleich der beiden Datenquellen mit langjährigen Messdaten der MeteoSchweiz hat für Meteonorm eine wesentlich höhere Übereinstimmung gezeigt. Die geringere Einstrahlung allein kann diese Abweichungen jedoch nicht vollständig erklären. Vielmehr führte die teilweise starke Unterschätzung der Einstrahlung mit dem Solar Radiation Tool dazu, dass viele landwirtschaftlichen Nutzflächen den Einstrahlungsgrenzwert von 1000 kWh/m²/a nicht erreichten und damit aus der Potenzialberechnung ausgeschlossen wurden. Im vorliegenden Bericht wird die Grenze von 1000 kWh/m² beibehalten. Zusätzlich zeigt Abbildung 10, wie sich das Potenzial verändern würde, wenn andere Einstrahlungsgrenzwerte verwendet würden.

4.2 Nähe zum Stromnetz

In Jäger et al. (2022) wurde die Nähe der Flächen für Agri-PV in der Schweiz zum Stromnetz basierend auf einer Analyse von Wang (2022) aufgezeigt. Obwohl die vorliegende Potenzialanalyse wesentlich mehr Flächen miteinbezieht, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Entfernung der Flächen zum Stromnetz nicht wesentlich verändert. Grund für diese Annahme ist, dass lediglich die Einstrahlungsgrundlage verändert wurde, nicht aber die Entfernung der Flächen zu Bauzonen und damit die Nähe zu bereits bestehender Infrastruktur. Tabelle 5 zeigt, den Anteil der Flächen pro Kulturgruppe, unterteilt in verschiedene Eignungskategorien. 27 % der Flächen bei Dauerkulturen und Dauergrünland sind zum Beispiel maximal 500 m vom Stromnetz entfernt. Bei den offenen Ackerflächen, welche das grösste Potenzial aufweisen, sind mit 53 % der Flächen über die Hälfte maximal 500 m vom Stromnetz entfernt. Maximal 1000 m vom Stromnetz entfernt sind rund ein Drittel der Dauerkulturen und Flächen im Dauergrünland. Knapp drei Viertel (71 %) der offenen Ackerflächen befinden sich in einem Abstand von maximal 1000 m vom Stromnetz.

Tabelle 5: Anteil am Potenzial der Agri-PV unterteilt nach der Eignung basierend auf der Entfernung zum Stromnetz. Als potenziell geeignet gelten grundsätzlich Flächen mit einer maximalen Entfernung von 1000 m zum Stromnetz. Es wird zwischen sehr guter, guter, mässiger und wenig Eignung unterschieden.

Kulturgruppe	Eignung basierend auf der Entfernung zum Stromnetz				
	Sehr gut (< 100 m)	gut (100–300 m)	Mässig (300-500 m)	Wenig (500-1000 m)	Total (0 – 1000 m)
Dauerkulturen	14 %	8 %	5 %	6 %	33 %
Dauergrünland	14 %	7 %	6 %	9 %	36 %
Offene Ackerfläche	27 %	14 %	12 %	18 %	71 %

In Bezug auf die Netznähe landwirtschaftlicher Nutzflächen ist zu erwähnen, dass die Analyse auf modellierten Standorten von Mittel- und Niederspannungsnetzen beruht (Wang, 2022). Dies lässt, wie in Tabelle 5 gezeigt, die Grössenordnung der Netznähe von Agri-PV im schweizerischen Mittel abschätzen. Für einzelne Flächen sind die modellierten Standorte nicht aussagekräftig, weshalb einzelne Flächen jeweils eine standortspezifische Beurteilung erfordern.

4.3 Puffer um Bauzonen

Das ermittelte theoretische Potenzial der Agri-PV basiert auf einem Puffer von 1000 m um Bauzonen. Auf Verordnungs- oder Gesetzesebene ist keine Entfernung definiert, welche dem Kriterium «wenig empfindliches Gebiet» entspricht. Das Potenzial der Agri-PV ist aber stark von der gewählten Puffergrösse abhängig. Die Flächen der Pufferzonen mit und ohne die eigentliche Bauzone sind der Tabelle 6 zu entnehmen. Bauzonen in der Schweiz umfassen eine Fläche von 2'343 km². Diese Fläche wird durch einen Puffer von 1000 m auf 21'504 km² vergrössert (19'161 km² ohne die Bauzone selbst). Im Gegensatz dazu beträgt die Fläche ohne Bauzone zum Beispiel bei einem 500 m Puffer lediglich 11'577 km².

Tabelle 6: Fläche von Bauzonen in der Schweiz sowie Flächen von Bauzonen inkl. verschiedener Puffergrössen basierend auf den harmonisierten Bauzonen der Schweiz (ARE, 2022). Bei der vorliegenden Potenzialstudie wurde mit einer Puffergrösse von 1000 m gerechnet.

Art	Fläche mit Bauzone in km ²	Fläche ohne Bauzone in km ²	Skalierungs- faktor
Bauzone ohne Puffer	2'343	0	0
Bauzone mit Puffer von 500 m	13'920	11'577	0.60
Bauzone mit Puffer von 1000 m	21'504	19'161	1.00
Bauzone mit Puffer von 1500 m	26'228	23'885	1.25

Unter Berücksichtigung der Flächen ohne Bauzone aus Tabelle 6 kann grob abgeschätzt werden, inwiefern das Potenzial der Agri-PV sich verändern würde, falls eine andere Puffergrösse eingesetzt wird. Ein Puffer von 500 m hätte demzufolge eine Reduktion des Potenzials um 40 % zur Folge (Skalierungsfaktor 0.6), wogegen ein Puffer von 1500 m eine Erhöhung des Potenzials um 25 % bedeuten würde (Skalierungsfaktor 1.25).

5 Literatur

- ARE. (2022). *Bauzonen Schweiz (harmonisiert)* [Gpkg]. Bundesamt für Raumentwicklung. <https://www.kgk-cgc.ch/geodaten/geodaten-bauzonen-schweiz>
- BFE. (2023). *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2022*. Bundesamt für Energie BFE. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html>
- BLW. (2023). *Landwirtschaftliche Kulturlächen Identifikator 153 Bezugsjahr 2023*. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis/landwirtschaftliche-kulturlaechen.html>
- Bucher, C., & Schwarz, R. (2021). *Studie Winterstrom Schweiz—Schlussbericht V3*. Energie-Experten. (o. J.). *Gelsdorf: Agri-PV-Anlage für klimafreundlichen Obstanbau*. energie-experten. Abgerufen 12. Oktober 2021, von <https://www.energie-experten.org/projekte/gelsdorf-agri-pv-anlage-fuer-klimafreundlichen-obstanbau>
- Hofgemeinschaft Heggelbach. (o. J.). *Regenerative Energien – Hofgemeinschaft Heggelbach*. Abgerufen 16. November 2021, von <https://hofgemeinschaft-heggelbach.de/energie>
- Hostettler, T. (2020). *Markterhebung Sonnenenergie 2019*. Swissolar. https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Markterhebung/Marktumfrage_2019.pdf
- Hostettler, T., & Hekler, A. (2021). *Statistik Sonnenenergie Referenzjahr 2020*. Bundesamt für Energie, Bern. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10539>
- Hostettler, T., & Hekler, A. (2022). *Statistik Sonnenenergie Referenzjahr 2021*. Bundesamt für Energie, Bern. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10986>
- Hostettler, T., & Hekler, A. (2023). *Statistik Sonnenenergie Referenzjahr 2022*. Bundesamt für Energie, Bern. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11461>
- Jäger, M., & Anderegg, D. (2023). *Potentialanalyse zur Agri-Photovoltaik im Kanton Schaffhausen*. Züricher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW.
- Jäger, M., Vaccaro, C., Boos, J., Junghardt, J., Strebel, S., Anderegg, D., Rohrer, J., & Schibli, B. (2022). *Machbarkeitsstudie Agri-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft*. <https://doi.org/10.21256/zhaw-25624>
- Meteotest. (2022). *GHI (TMY) Rasterdatensatz, 100m Auflösung, Jahres- und Monatssumme*.
- Next2Sun. (2020). *Eröffnung der ersten kommerziellen Agri-Photovoltaikanlage der Next2Sun in Donaueschingen mit prominenten Gästen und Live-Vorführung*. Pressemitteilung.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., & Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Wang, J. (2022). *Assessment of Agrivoltaics for the Transition of the Swiss Electricity System*.

Anhang

Tabelle 7: Zuweisung des Bewirtschaftungsstatus pro landwirtschaftliche Nutzfläche gemäss Identifikator 153 für die Potenzialberechnung von Agri-PV. Die Spalte «berücksichtigt» zeigt, ob die Flächen als potenziell geeignet eingestuft werden. Ausgeschlossen wurden primär die Flächen mit Bewirtschaftungsstatus BFF und Sömmerungsgebiete. Desweiteren wurden Flächen mit Hochstamm-Bäumen sowie einige Spezialfälle ausgeschlossen.

Code	Bezeichnung	Bewirtschaftungsstatus	berücksichtigt
501	Sommergerste	Offene Ackerfläche	Ja
502	Wintergerste	Offene Ackerfläche	Ja
504	Hafer	Offene Ackerfläche	Ja
505	Triticale	Offene Ackerfläche	Ja
506	Mischel Futtergetreide	Offene Ackerfläche	Ja
507	Futterweizen gemäss Sortenliste swiss granum	Offene Ackerfläche	Ja
508	Körnermais	Offene Ackerfläche	Ja
510	Hartweizen	Offene Ackerfläche	Ja
511	Emmer, Einkorn	Offene Ackerfläche	Ja
512	Sommerweizen (ohne Futterweizen der...	Offene Ackerfläche	Ja
513	Winterweizen (ohne Futterweizen der...	Offene Ackerfläche	Ja
514	Roggen	Offene Ackerfläche	Ja
515	Mischel Brotgetreide	Offene Ackerfläche	Ja
516	Dinkel	Offene Ackerfläche	Ja
519	Saatmais (Vertragsanbau)	Offene Ackerfläche	Ja
520	Trockenreis	Offene Ackerfläche	Ja
521	Silo- und Grünmais	Offene Ackerfläche	Ja
522	Zuckerrüben	Offene Ackerfläche	Ja
523	Futterrüben	Offene Ackerfläche	Ja
524	Kartoffeln	Offene Ackerfläche	Ja
525	Pflanzkartoffeln (Vertragsanbau)	Offene Ackerfläche	Ja
526	Sommerraps zur Speiseölgewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
527	Winterraps zur Speiseölgewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
528	Soja	Offene Ackerfläche	Ja
529	Nassreis	Offene Ackerfläche	Nein
531	Sonnenblumen zur Speiseölgewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
534	Lein	Offene Ackerfläche	Ja
536	Bohnen und Wicken zur Körnergewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
537	Erbsen zur Körnergewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
538	Lupinen	Offene Ackerfläche	Ja
539	Ölkürbisse	Offene Ackerfläche	Ja
540	Kichererbsen	Offene Ackerfläche	Ja
541	Tabak S	Offene Ackerfläche	Ja
543	Getreide siliert	Offene Ackerfläche	Ja
544	Leindotter	Offene Ackerfläche	Ja
545	Einjährige Freilandgemüse, ohne Konservenge...	Offene Ackerfläche	Ja
546	Freiland-Konservengemüse	Offene Ackerfläche	Ja
547	Wurzeln der Treibzichorie	Offene Ackerfläche	Ja
548	Buchweizen	Offene Ackerfläche	Ja
551	Einjährige Beeren (z.B. Erdbeeren)	Offene Ackerfläche	Ja
552	Einjährige nachwachsende Rohstoffe	Offene Ackerfläche	Ja

553	Einjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen	Offene Ackerfläche	Ja
554	Einjährige gärtnerische Freilandkulturen	Offene Ackerfläche	Ja
556	Buntbrache	BFF	Nein
557	Rotationsbrache	BFF	Nein
559	Saum auf Ackerfläche	BFF	Nein
566	Mohn	Offene Ackerfläche	Ja
567	Saflor	Offene Ackerfläche	Ja
568	Linsen	Offene Ackerfläche	Ja
569	Mischungen von Bohnen...	Offene Ackerfläche	Ja
570	Mischungen von Linsen...	Offene Ackerfläche	Ja
572	Nützlingsstreifen auf offener Ackerfläche	BFF	Nein
573	Senf	Offene Ackerfläche	Ja
574	Quinoa	Offene Ackerfläche	Ja
575	Hanf zur Nutzung der Samen	Offene Ackerfläche	Ja
576	Hanf zur Fasernutzung	Offene Ackerfläche	Ja
577	Anderer Hanf	Offene Ackerfläche	Ja
578	Hirse zur Körnergewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
579	Hirse zur Nutzung ganze Pflanze	Offene Ackerfläche	Ja
580	Sorghum zur Körnergewinnung	Offene Ackerfläche	Ja
581	Sorghum zur Nutzung ganze Pflanze	Offene Ackerfläche	Ja
590	Sommerraps als nachwachsender Rohstoff	Offene Ackerfläche	Ja
591	Winterraps als nachwachsender Rohstoff	Offene Ackerfläche	Ja
592	Sonnenblumen als nachwachsender Rohstoff	Offene Ackerfläche	Ja
594	Offene Ackerfläche, beitragsberechtigt, BFF	BFF	Nein
595	Übrige offene Ackerflächen	Offene Ackerfläche	Ja
597	Übrige offene Ackerfläche, beitragsberechtigt	Offene Ackerfläche	Ja
598	Übrige offene Ackerfläche, nicht beitragsber...	Offene Ackerfläche	Ja
601	Kunstwiesen (ohne Weiden)	Offene Ackerfläche	Ja
602	Übrige Kunstwiese, beitragsberechtigt	Offene Ackerfläche	Ja
611	Extensiv genutzte Wiesen (ohne Weiden) BFF	BFF	Nein
612	Wenig intensiv genutzte Wiesen (ohne Weiden)	BFF	Nein
613	Übrige Dauerwiesen (ohne Weiden)	Dauergrünland	Ja
616	Weiden (Heimweiden, übrige Weiden ohne Sömmer	Dauergrünland	Ja
617	Extensiv genutzte Weiden BFF	BFF	Nein
618	Waldweiden (ohne bewaldete Fläche) BFF	BFF	Nein
621	Heuwiesen im Sömmerungsgebiet, Übrige Wiesen	Sömmerungsgebiet	Nein
622	Heuwiesen im Sömmerungsgebiet, Typ extensiv	BFF	Nein
623	Heuwiesen im Sömmerungsgebiet, Typ wenig int...	BFF	Nein
625	Waldweiden (ohne bewaldete Fläche)	Keine LN	Nein
631	Futterleguminosen für die Samenproduktion	Offene Ackerfläche	Ja
632	Futtergräser für die Samenproduktion	Offene Ackerfläche	Ja
635	Uferwiesen (ohne Weiden) BFF	BFF	Nein
693	Regionsspezifische Biodiversitätsförderfläche	BFF	Nein
694	Regionsspezifische Biodiversitätsförderfläche	BFF	Nein
697	Übrige Grünfläche (Dauergrünfläche), beitrags...	Dauergrünland	Ja
698	Übrige Grünfläche (Dauergrünflächen), nicht b...	Dauergrünland	Ja
701	Reben	Dauerkultur	Ja
702	Obstanlagen (Äpfel)	Dauerkultur	Ja
703	Obstanlagen (Birnen)	Dauerkultur	Ja

704	Obstanlagen (Steinobst)	Dauerkultur	Ja
705	Mehrfährige Beeren	Dauerkultur	Ja
706	Mehrfährige Gewürz- und Medizinalpflanzen	Dauerkultur	Ja
707	Mehrfährige nachwachsende Rohstoffe (China...	Dauerkultur	Ja
708	Hopfen	Dauerkultur	Ja
709	Rhabarber	Dauerkultur	Ja
710	Spargel	Dauerkultur	Ja
711	Pilze (Freiland)	Dauerkultur	Ja
712	Christbäume	Dauerkultur	Nein
713	Baumschule von Forstpflanzen ausserhalb ...	Dauerkultur	Nein
714	Ziersträucher, Ziergehölze und Zierstauden	Dauerkultur	Nein
717	Rebflächen mit natürlicher Artenvielfalt BFF	BFF	Nein
718	Trüffelanlagen	Dauerkultur	Nein
719	Maulbeerbaumanlagen (Fütterung Seidenraupen)	Dauerkultur	Nein
720	Gepflegte Selven (Kastanienbäume)	Dauerkultur	Nein
721	Mehrfährige gärtnerische Freilandkulturen	Dauerkultur	Ja
722	Baumschulen von Reben	Dauerkultur	Ja
723	Baumschulen von Obst und Beeren	Dauerkultur	Ja
724	Übrige Baumschulen (Rosen, Zierstauden, usw.)	Dauerkultur	Ja
725	Permakultur	Dauerkultur	Ja
730	Obstanlagen aggregiert	Dauerkultur	Ja
731	Andere Obstanlagen (Kiwi, Holunder usw.)	Dauerkultur	Ja
735	Reben (regionsspezifische Biodiversitätsförde...	BFF	Nein
750	Übrige Dauerkulturen, beitragsberechtigt, agg...	Dauerkultur	Ja
797	Übrige Flächen mit Dauerkulturen, beitragsber...	Dauerkultur	Ja
798	Übrige Flächen mit Dauerkulturen, nicht beitr...	Dauerkultur	Ja
801	Gemüsekulturen in Gewächshäusern mit festem ...	Geschützter Anbau	Ja
802	Übrige Spezialkulturen in Gewächshäusern mit ...	Geschützter Anbau	Ja
803	Gärtnerische Kulturen in Gewächshäusern mit f...	Geschützter Anbau	Ja
804	Beerenkulturen in Gewächshäusern mit festem F...	Geschützter Anbau	Ja
807	Übrige Spezialkulturen in geschütztem Anbau o...	Geschützter Anbau	Ja
808	Gärtnerische Kulturen in geschütztem Anbau oh...	Geschützter Anbau	Ja
810	Pilze in geschütztem Anbau mit festem Fundam...	Geschützter Anbau	Ja
811	Gemüsekulturen in geschütztem Anbau ohne ...	Geschützter Anbau	Ja
812	Gemüsekulturen in geschütztem Anbau ohne ...	Geschützter Anbau	Ja
813	Beerenkulturen in geschütztem Anbau ohne fest...	Geschützter Anbau	Ja
814	Beerenkulturen in geschütztem Anbau ohne fest...	Geschützter Anbau	Ja
830	Kulturen in ganzjährig geschütztem Anbau, bei...	Geschützter Anbau	Ja
847	Übrige Kulturen in geschütztem Anbau ohne fes...	Geschützter Anbau	Ja
848	Übrige Kulturen in geschütztem Anbau mit fest...	Geschützter Anbau	Ja
849	Übrige Kulturen in geschütztem Anbau ohne fes...	Geschützter Anbau	Ja
851	Streuflächen in der LN BFF	BFF	Nein
852	Hecken-, Feld- und Ufergehölze (mit Krautsaum...	BFF	Nein
857	Hecken-, Feld- und Ufergehölze (mit Pufferstr...	BFF	Nein
858	Hecken-, Feld- und Ufergehölze (mit Pufferstr...	BFF	Nein
897	Übrige Flächen innerhalb der LN, beitragsbere...	Dauerkultur	Ja
898	Übrige Flächen innerhalb der LN, nicht beitra...	Dauerkultur	Ja
901	Wald	Keine LN	Nein
902	Übrige unproduktive Flächen (z.B. gemulchte F...	Keine LN	Nein

903	Flächen ohne landwirtschaftliche Hauptzweckbe...	Keine LN	Nein
904	Wassergräben, Tümpel, Teiche BFF	BFF	Nein
905	Ruderalflächen, Steinhaufen und -wälle BFF	BFF	Nein
906	Trockenmauern BFF	BFF	Nein
907	Unbefestigte, natürliche Wege	Keine LN	Nein
908	Regionsspezifische Biodiversitätsförderfläche	BFF	Nein
909	Hausgärten	Keine LN	Nein
911	Landwirtschaftliche Produktion in Gebäuden	Geschützter Anbau	Ja
921	Hochstamm-Feldobstbäume (nur Flächen) BFF	BFF	Nein
922	Nussbäume (nur Flächen) BFF	BFF	Nein
923	Kastanienbäume in gepflegten Selven	BFF	Nein
924	Einheimische standortgerechte Einzelbäume un...	BFF	Nein
926	Andere Bäume	Dauerkultur	Nein
927	Andere Bäume (regionsspezifische Biodiversitä...	BFF	Nein
928	Andere Elemente (regionsspezifische Biodivers...	BFF	Nein
930	Sömmerungsweiden	Sömmerungsgebiet	Nein
933	Gemeinschaftsweiden	Sömmerungsgebiet	Nein
935	Heuwiesen mit Zufütterung während der Sömme...	Sömmerungsgebiet	Nein
936	Streuflächen im Sömmerungsgebiet	Sömmerungsgebiet	Nein
950	Ackerschonstreifen BFF	BFF	Nein
951	Getreide in weiten Reihen BFF	BFF	Nein
998	Übrige Flächen ausserhalb der LN und SF	Keine LN	Nein

Tabelle 8: Potenzial der Agri-PV pro Kanton unter Berücksichtigung der Ausschlusskriterien, inkl. Flächen mit Anbau von Mais.

Kanton	Potenzial in TWh/a	Anteil am Gesamtpotenzial in %
Bern	59.6	18.4
Waadt	50.2	15.5
Freiburg	34.4	10.6
Zürich	25.9	8.0
Luzern	21.6	6.7
Aargau	21.1	6.5
Thurgau	20.4	6.3
St.Gallen	16.9	5.2
Solothurn	10.2	3.2
Wallis	9.4	2.9
Graubünden	9.4	2.9
Jura	9.4	2.9
Basel-Landschaft	6.1	1.9
Genf	5.1	1.6
Neuchatel	4.9	1.5
Schwyz	4.1	1.3
Tessin	2.8	0.9
Appenzell Ausserrhoden	2.2	0.7
Zug	2.0	0.6
Schaffhausen	1.7	0.5
Obwalden	1.6	0.5
Appenzell Innerrhoden	1.4	0.4
Glarus	1.4	0.4
Uri	0.9	0.3
Nidwalden	0.7	0.2
Basel Stadt	0.1	0.2