

Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz

Bedarf, Potential und Umsetzung



Bild: Colourbox.com

Schriftenreihe Erneuerbare Energien, Bodenökologie und Ökotechnologie,
Herausgeber: ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

<https://doi.org/10.21256/zhaw-2654>

Autor: Jürg Rohrer

Wädenswil, Juli 2020

Erstellt im Auftrag der Schweizerischen Energie-Stiftung (SES).

Für den Inhalt dieses Dokumentes ist ausschliesslich der Autor zuständig.

Adresse

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Jürg Rohrer, Leiter Forschungsgruppe Erneuerbare Energien
Campus Grüental
CH-8820 Wädenswil
www.zhaw.ch/iunr/erneuerbareenergien

Zusammenfassung

Der Bundesrat hat sich zum Ziel gesetzt, dass die Schweiz bis 2050 klimaneutral werden soll. Dies bedeutet, dass bis spätestens 2050 die Treibhausgasemissionen im Inland auf Netto-Null reduziert werden müssen. Da aktuell Dreiviertel der Schweizer Treibhausgasemissionen energiebedingt sind, wird dieses Ziel grosse Auswirkungen auf das Energiesystem haben: das Energiesystem muss dekarbonisiert werden.

Die Dekarbonisierung wird zu einem zunehmenden Bedarf an Strom führen. Zusätzlich muss der wegfallende Strom aus Atomkraftwerken ersetzt werden. Dies gilt auch für die benachbarten Länder, sodass die Möglichkeit Strom zu importieren, in Zukunft mindestens zu gewissen Zeiten eingeschränkt sein könnte. Der zusätzliche Strombedarf infolge der Dekarbonisierung des Verkehrs, der Wärmeerzeugung für Gebäude sowie dem Ausschalten der AKW kann grundsätzlich durch erneuerbare Energien innerhalb der Schweiz erzeugt werden.

Zieht man vom zukünftigen Strombedarf für das Jahr 2050 die Potentiale von Windkraft, Wasserkraft, Biomasse und die Effizienzpotentiale ab, so verbleibt ein Strombedarf von ca. 44 TWh. Dies entspricht ungefähr einer konservativen Abschätzung des Potentials für Photovoltaik auf Gebäuden, Parkplätzen, und Autobahnböschungen. Die Dekarbonisierung der übrigen Bereiche und die Zwischenspeicherung von Strom (Umwandlungs- und Speicherverluste) wird den Strombedarf zusätzlich erhöhen, sodass entweder grössere Anstrengungen im Bereich Energieeffizienz oder die Erschliessung weiterer Potenziale wie z.B. der Bau von PV-Anlagen über Perrons, auf Strassen, über Lawinenverbauungen, sowie auf Freiflächen im Gebirge oder im Flachland notwendig sein werden.

Damit eine PV-Produktion von 44 TWh bis 2050 erreicht werden kann, sollten die Potentiale auf den Gebäudehüllen möglichst vollständig ausgeschöpft werden und der Zubau von Photovoltaik muss um den Faktor 4 beschleunigt werden. Dies erfordert gegenüber heute zusätzliche politische Massnahmen, wie zum Beispiel eine Solarpflicht für bestehende Gebäude oder Vorgaben an die Kantone für die Produktion von erneuerbaren Energien.

Ein rascherer Ausbau der Photovoltaik würde innerhalb von drei bis vier Jahren etwa 14'000 neue Arbeitsplätze im Bausektor schaffen. Davon wären 12'000 Arbeitsplätze für Monteure, welche durch eine kurze Anlehre von wenigen Tagen oder Wochen umgeschult werden könnten. Die restlichen rund 2'000 Arbeitsplätze betreffen PV-Fachplaner, welche je nach Vorbildung eine etwa halbjährige Umschulung benötigen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1. Einleitung und Zielsetzung	5
2. Zukünftiger Strombedarf und Stromproduktion ohne Photovoltaik	5
2.1 Schätzung des zusätzlichen Strombedarfes zur Dekarbonisierung.....	6
3. PV-Dachflächenpotentiale der Schweiz	7
3.1 Analyse des Potentials für PV-Anlagen auf Dächern.....	9
4. Potentiale ausserhalb von Gebäuden	11
5. Kosten für die PV-Anlagen.....	11
6. Vergleich von Potential und Bedarf.....	12
7. Vorschlag für den Ausbau der PV-Produktion in der Schweiz.....	14
7.1 Personalbedarf bzw. Ausbildung von zusätzlichem Personal	14
7.2 Jobmotor Photovoltaik	16
8. Politische Massnahmen.....	17
8.1 Solarpflicht für alle geeigneten Gebäude.....	18
8.2 Kantone in die Pflicht nehmen	18
8.3 Ausbildung von Arbeitskräften.....	19
9. Literaturverzeichnis.....	20

1. Einleitung und Zielsetzung

Um der Klimaerhitzung einigermaßen wirksam entgegen zu können, muss der weltweite Ausstoss von Treibhausgasen in den nächsten 10 bis 15 Jahren massiv gesenkt werden. Die Schweiz hat das Übereinkommen von Paris mitunterzeichnet. Dieses hat zum Ziel, die globale Erwärmung auf maximal 1.5°C zu begrenzen. Um dieses Ziel mit einer 67%igen Wahrscheinlichkeit und ohne Massnahmen zur Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre zu erreichen, muss die Schweiz bis zum Jahr 2030 Netto-Null Treibhausgasemissionen erreichen (Rohrer, 2019). Der Bundesrat möchte Netto-Null Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 erreichen (Bundesrat, 2019).

Dreiviertel der Schweizer Treibhausgasemissionen der Schweiz sind energiebedingt, sie stammen vorwiegend aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern (Bundesamt für Energie BFE, 2019). Deshalb kommt dem Übergang auf eine fossilfreie Energieversorgung, der sogenannten Dekarbonisierung des Energiesystems, eine enorm wichtige Bedeutung zu. Es ist abzusehen, dass dies zu einer Zunahme des Strombedarfs führen wird, zum Beispiel durch den Übergang auf Elektromobilität und durch den Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Gebäuden. Dieser zusätzliche Strombedarf wird durch eine Erhöhung der inländischen Stromproduktion oder der Stromimporte gedeckt werden müssen. Das Potential von zusätzlichen Stromimporten ist jedoch unsicher, da auch die Nachbarländer eine Dekarbonisierung ihres Energiesystems anstreben und dadurch ihre Kapazitäten für den Stromexport kleiner werden könnten. Aus diesem Grund wird nachfolgend davon ausgegangen, dass ein möglichst hoher Selbstversorgungsgrad der Schweiz mit inländischem Strom wünschenswert ist.

Das mit Abstand grösste Potential zur Strom-Mehrproduktion in der Schweiz haben Photovoltaik-Anlagen (Rohrer & Sperr, 2018). In diesem Kurzbericht wird nun abgeschätzt, wie rasch und wie stark die Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz ausgebaut werden könnte und wie dadurch eine Vollversorgung der Schweiz mit Strom in der Jahresbilanz möglich wäre. Dabei wird auch aufgezeigt, wie viele neuen Arbeitsstellen damit in der Photovoltaik-Branche geschaffen werden könnten.

2. Zukünftiger Strombedarf und Stromproduktion ohne Photovoltaik

Die nachfolgenden Zahlen beziehen sich auf das Zieljahr von 2030 bzw. 2050 für das Erreichen einer vollständigen Dekarbonisierung in den Bereichen Mobilität (ohne internationalen Flugverkehr) und Gebäudeenergie. Der Übergang von heute bis 2030 bzw. 2050 in der Zusammensetzung der Energieträger wurde jeweils linear angenommen. Der grosse Teil des Strom-Mehrbedarfes im Jahr 2050 gegenüber 2030 stammt aus dem Ersatz des Stromes aus Atomkraftwerken. Es wurde davon ausgegangen, dass die verbleibenden AKW zwischen 2030 und 2040 stillgelegt werden. Für Details zu den Annahmen siehe Sperr & Rohrer (2019a, 2019b).

Es werden zwei unterschiedliche Szenarien unterschieden:

a) Szenario «Wachstum gemäss Bund»

Beim Wachstum für Einwohner, Warenverkehr, Personen-Kilometer, Wärmebedarf, usw. werden die offiziellen Prognosen des Bundes verwendet. Die wichtigsten Annahmen sind:

- Zunahme der Kilometerleistungen in der Mobilität gemäss Wüthrich et al. (2017), keine Suffizienzmassnahmen.
- Sanierungsrate im Gebäudebereich weiterhin 1% pro Jahr.

- Ausschöpfung des vollen Ausbaupotentials gemäss BFE für Wasserkraft (ergibt zusätzlich 2.2 TWh pro Jahr) und Biomasse (ergibt zusätzlich 3.2 TWh pro Jahr) zur Stromerzeugung bis 2030 anstatt bis 2050 (BFE, 2018a, 2019; VSE, 2018).
- Ausschöpfung des halben Effizienzpotentials im Strombereich bis 2030. Dies ergibt Stromersparungen von 9 TWh pro Jahr bis 2030.
- Ausschöpfung von einem Drittel des Potentials an Windkraft gemäss BFE bis 2030 und des vollen Potentials bis 2050. Dies entspricht einer Produktion von 1.5 TWh pro Jahr mit ca. 300 neuen Windkraftanlagen bis 2030 respektive 4.3 TWh pro Jahr mit ca. 800 Windkraftanlagen.

Das nachfolgend skizzierte Szenario «Effizienz und Suffizienz» berücksichtigt wesentlich umfassendere Massnahmen zur Reduktion des Energiebedarfes. Einerseits wird die Sanierungsrate bei Gebäuden um den Faktor drei höher angenommen als sie heute und im Szenario «Wachstum gemäss Bund» ist. Andererseits wird angenommen, dass die Verkehrsleistung bis 2030 um 20% reduziert wird und danach auf diesem Niveau bleibt. Damit soll der Effekt von Effizienz- und Suffizienzmassnahmen auf den Energiebedarf und auf die erforderliche Ausschöpfung des PV-Potentials exemplarisch aufgezeigt werden.

b) Szenario «Effizienz und Suffizienz»

Gegenüber den Annahmen des Bundes (Szenario «Wachstum gemäss Bund») wurde für die Entwicklung des Energiebedarfes folgende geänderten Annahmen getroffen:

- Die Kilometerleistungen in der Mobilität nehmen bis 2030 gegenüber heute in allen Bereichen um 20% ab und bleiben danach bis 2050 konstant.
- Die Sanierungsrate im Gebäudebereich beträgt ab 2020 konstant 3% pro Jahr.

Alle anderen Annahmen, wie zum Beispiel die Bevölkerungsentwicklung oder der Wohnflächenbedarf fürs Wohnen, wurden unverändert vom Bund bzw. vom Szenario «Wachstum gemäss Bund» übernommen.

2.1 Schätzung des zusätzlichen Strombedarfes zur Dekarbonisierung

Nachfolgend wird die Dekarbonisierung der Mobilität und der Wärmeherzeugung für Gebäude betrachtet. Der gewählte Technologie-Mix führt zu einer Zunahme des Strombedarfes. Tabelle 1 zeigt, wie stark die Produktion aus Photovoltaik-Anlagen bei beiden Szenarien zugebaut werden muss, um beim Strom eine ausgeglichene Jahresbilanz zu erhalten. Die Zahlen stammen aus dem noch unveröffentlichten Dekarbonisierungsrechner der ZHAW Wädenswil sowie aus Rohrer & Sperr (2018) und Sperr & Rohrer (2018, 2019b, 2019a).

Bei den oben genannten Zahlen handelt es sich um Jahresbilanzdaten. Nicht berücksichtigt wurde dabei die Dekarbonisierung in Industrie, Landwirtschaft und Flugverkehr. Eine allfällige Speicherung des Stroms (Tag/Nacht oder saisonal) und die daraus entstehenden Umwandlungs- und Speicherverluste sind in den Zahlen ebenfalls nicht berücksichtigt. Für Batteriespeicher würden diese Verluste 10-15%, für Pumpspeicherkraftwerke 25-30% und für eine Speicherung in Form von Gas 60-70% betragen.

Nun soll abgeschätzt werden, wie der in Tabelle 1 gezeigte Bedarf von 25 TWh bis 2030 bzw. 44 TWh bis 2050 im Szenario «Wachstum gemäss Bund» durch Photovoltaik-Anlagen gedeckt werden kann.

Tabelle 1: Zusätzlicher Strombedarf aus der Dekarbonisierung der Mobilität (ohne internationalen Flugverkehr) und der Wärmeerzeugung für Gebäude sowie Potentiale für Stromeinsparungen und Ausbau der Stromversorgung ohne Photovoltaik. Die Differenz zwischen Bedarf und Potentiale der erneuerbaren Energien ohne PV muss entweder durch Photovoltaik oder durch Importe gedeckt werden. Bei den Wärmepumpen (WP) wurde eine Jahresarbeitszahl von 3 angenommen. Die Zahlen stammen aus dem noch unveröffentlichten Dekarbonisierungsrechner der ZHAW Wädenswil.

Szenario:	Wachstum gemäss Bund		Effizienz und Suffizienz	
	2030 [TWh]	2050 [TWh]	2030 [TWh]	2050 [TWh]
Autos 100% elektrisch	14.2	15.4	10.9	10.9
Lieferwagen 100% elektr.	2.74	3.46	2	2
LKW 80% elektr., 20% Wasserstoff	4.74	5.7	3.5	3.5
Gebäude 80% WP, 20% Holz / Solar	18.6	15.8	15.9	11.4
Ersatz von AKW		22		22
Summe Bedarf	40.28	62.36	32.3	49.8
Allg. Stromeffizienz, halbes Potential	9	9	9	9
Wasserkraft	2.2	2.2	2.2	2.2
Biomasse	3.2	3.2	3.2	3.2
Windkraft	1.5	4.3	1.5	4.3
Verbleibend für PV	24.38	43.66	16.4	31.1

3. PV-Dachflächenpotentiale der Schweiz

Untersuchungen zeigen, dass sich rund 30% der Dachflächen von Schweizer Gebäuden für die Installation einer Solaranlage eignen (Gutschner et al., 2010; Nowak et al., 2007; Nowak & Gutschner, 2011). In einer ersten Näherung können wir die Dachflächen den Grundflächen aller Gebäude gleichsetzen, welche gemäss Walch et al (2019) 485 km² betragen. Dies entspricht somit einer Modulfläche von 145.5 km² und mit 0.188 kWp/m² und 970 kWh/kWp einem Ertrag von 26.5 TWh pro Jahr. Dieses Potential wurde auch im 2012 im Internet publizierten Potentialrechner für erneuerbare Energien pro Gemeinde¹ eingesetzt (Eymann et al., 2014).

Gemäss den Daten von Sonnendach.ch beträgt das PV-Potential auf «gut», «sehr gut» und «hervorragend» geeigneten Dachflächen in der Schweiz 77.8 TWh pro Jahr. Zieht man gemäss Remund et al. (2019) 5% für geschützte Gebäude davon ab, verbleiben 74 TWh pro Jahr.

Dabei wurden jeweils die gesamten Dachflächen der Eignungskategorien «gut», «sehr gut» und «hervorragend» eingerechnet. Einer Abklärung durch Portmann et al. (2019) folgend, muss normalerweise 30% der Dachfläche abgezogen werden, bei Flachdächern auf Mehrfamilienhäusern (MFH) beträgt der Abzug 58%. Diese Abzüge beinhalten Kamine, Dachfenster, begehbare Terrassen, Geländer, Dachaufbauten, usw. Da 6% der Potentiale von MFH stammen, beträgt der Abzug im Durchschnitt 32% (94% mit 30% und 6% mit 58%). Die Abzüge wurden durch Expertenbefragungen bestimmt, die genaue Methodik oder Rohdaten wurden aber nicht veröffentlicht (Portmann et al., 2019). Andere Studien kamen, teilweise unter

¹ Abrufbar unter <https://potential-erneuerbar.winterstrom.ch/>

Benutzung von rechnergestützten Dachauslegungen, zu grösseren Abzügen in der Grössenordnung von 40 bis 45% (Assouline et al., 2017, 2018; Walch et al., 2020).

Somit ergibt sich aus den Daten von Sonnendach.ch ein Dachflächenpotential zwischen 40 und 50 TWh pro Jahr. Das BFE geht aufgrund der oben genannten Daten von einem Potential von 50 TWh aus (BFE, 2018b) und nennt dies das ausschöpfbare Potential. Swissolar kommt auf ein ähnliches Potential von 49.1 TWh (Remund et al., 2019). Swissolar geht allerdings davon aus, dass nur rund die Hälfte des von ihnen bestimmten Potentials in den nächsten 30 Jahren realisiert werden kann, also rund 24 TWh pro Jahr (Remund et al., 2019).

Eine neue Studie der ETH Lausanne beziffert das ausschöpfbare Potential auf Schweizer Dachflächen jedoch nur auf 24.6 (± 9) TWh pro Jahr (Walch et al., 2020). Als Hauptgründe für den Unterschied insbesondere zur Schätzung von Sonnendach.ch werden das unterschiedliche Einstrahlungsmodell, die maschinengestützte Anordnung der Module auf den Dächern und detailliertere Verschattungsrechnungen vermutet (Walch et al., 2019). Nachvollziehbar wird der grosse Unterschied dadurch aber nicht wirklich.

Auf den ersten Blick scheinen die Potentialabschätzungen für Schweizer Dächern mit einer Bandbreite von 24.6 bis 49.1 TWh pro Jahr somit sehr weit auseinander zu liegen. Auffallend im Vergleich mit allen anderen Abschätzungen ist der hohe Wert aus Sonnendach.ch (siehe Abb. 1). Geht man analog zu Remund et al.(2019) davon aus, dass nur rund die Hälfte des von Sonnendach.ch berechneten Potentials bis 2050 umgesetzt werden kann, ergibt sich ein Potential in der gleichen Grössenordnung wie die anderen Abschätzungen.

Da sich der Zeithorizont dieses Berichtes auf 2030 bzw. maximal 2050 bezieht, erscheint ein **ausschöpfbares Potential von 24 bis 25 TWh auf Dächern** als aktuell vertrauenswürdigste und sinnvollste Schätzung. Dazu kann das vom BFE auf 17 TWh und von Swissolar auf 8 TWh geschätzte Potential auf Fassaden addiert werden, sodass sich auf Schweizer Gebäuden die Grössenordnung von 30 bis 33 TWh Strom aus Photovoltaik pro Jahr erzeugen liesse. Offen ist allerdings noch die Frage, wie die Gebäudebesitzer zum Bau von PV-Anlagen motiviert werden können (siehe Kapitel 8 Politische Massnahmen).

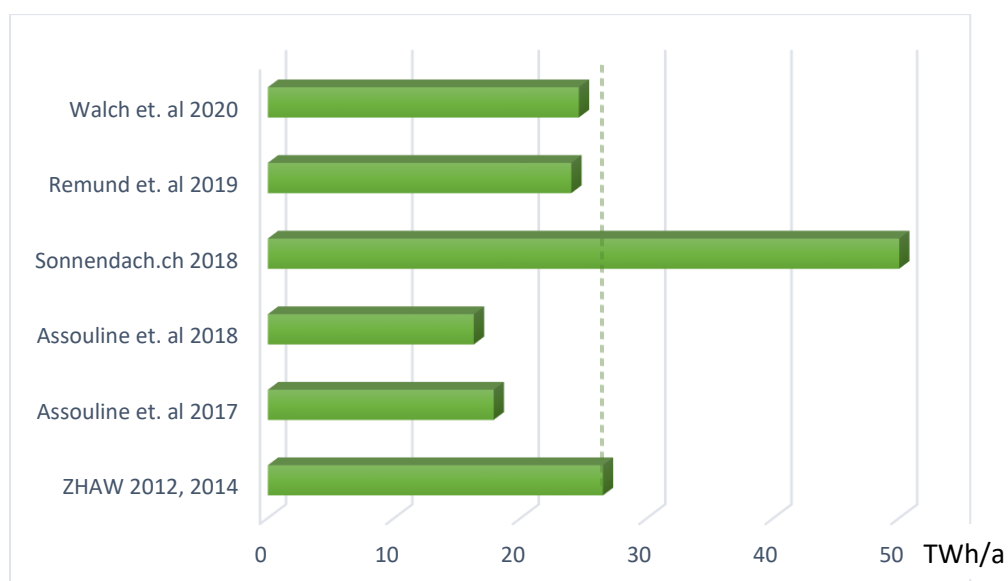


Abb. 1: Verschiedene Abschätzungen des Potentials für Photovoltaik auf Dachflächen von Gebäuden in der Schweiz (Zahlen in TWh pro Jahr). In dieser Studie wird mit einem Potential von 24 bis 25 TWh pro Jahr auf Dachflächen gerechnet (gestrichelte Linie).

3.1 Analyse des Potentials für PV-Anlagen auf Dächern

Die Grösse einer PV-Anlage hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten der Anlage und somit auf die Gestehungskosten des Stroms. Die detaillierten Daten der einzelnen Dächer wurden nur von Sonnendach.ch veröffentlicht, deshalb wird die Analyse anhand dieser Daten vorgenommen. Setzt man bei der Anzahl bzw. den Flächen jeweils den Faktor 50% ein, dürften die Aussagen auf das oben als vertrauenswürdigste Schätzung genannte Potential von 24 bis 25 TWh übertragbar sein.

Für die Analyse wurde angenommen, dass mehrere Dachflächen auf einem Gebäude in der Regel pro Gebäude zu einer einzigen PV-Anlage zusammengefasst würden. Deshalb wurden die Teilflächen mit identischer UUID² summiert und als «PV-Anlage» oder «Gebäude» bezeichnet.

Im Weiteren wurden nur Dachflächen mit einer jährlichen Einstrahlung von mindestens 1'000 kWh/m² berücksichtigt. Dies entspricht einer gut, sehr gut oder hervorragend geeigneten Dachfläche (Bundesamt für Energie, o. J.).

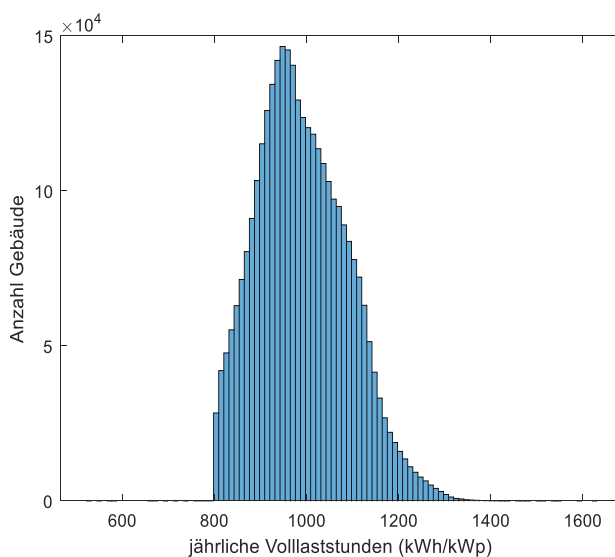


Abb. 2: Verteilung der normierten PV-Erträge auf die Anzahl Gebäude bzw. PV-Anlagen gemäss Sonnendach.ch. Für Dachaufbauten wurde ein pauschaler Abzug von 30% pro Dachfläche gemacht.

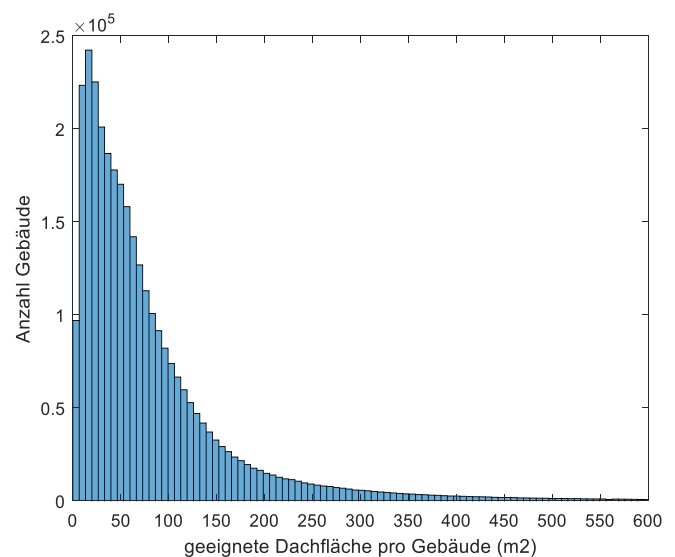


Abb. 3: Verteilung der Dachflächengrössen gemäss Sonnendach.ch (rohe Flächen, ohne Korrekturfaktoren als Pauschalabzug für Kamine, Dachaufbauten, usw.)

Abbildung 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung des normierten Jahresertrags der PV-Anlagen auf Dächern gemäss Sonnendach.ch. Die meisten Anlagen befinden sich wie die heute installierten PV-Anlagen im Bereich zwischen 900 und 1'100 kWh/kWp. Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Dachflächengrössen in m² aus Sonnendach.ch, die sich grundsätzlich für die Montage einer PV-Anlage eignen. In Abbildung 4 ist die Anzahl PV-Anlagen nach Anlagengrössen dargestellt. Die Häufigkeitsverteilung der jährlichen Stromerträge für Kategorien von Anlagengrössen ist ebenfalls in Tabelle 2 und in Abbildung 5 dargestellt. Als Datenquelle für die Kategorisierung wurden immer die Zahlen von Sonnendach.ch mit

² Sonnendach.ch beruht auf der Erfassung von einzelnen Dachflächen. Für die meisten Gebäude enthält die Datenbank mehrere Einträge von Dachflächen, welche in der Praxis zu einer PV-Anlage zusammengefasst würden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden nach telefonischer Rücksprache mit Swisstopo die Dachflächen mit identischer UUID summiert und jeweils als eine einzige Anlage betrachtet. UUID ist die Gebäudeidentifikation im Datensatz swissBUILDINGS^{3D} 2.0.

einer pauschalen Reduktion von 30% der Dachflächen bzw. Erträge gewählt. Die Dachflächen wurden zudem mit der UUID zu PV-Anlagen aggregiert.

Aus Tabelle 2 bzw. Abbildung 5 ist zu sehen, dass typische Anlagen auf Einfamilienhäusern mit einer Leistung von 2 bis 20 kWp (10 bis 100 m² Modulfläche) ca. 36% des Stroms auf Dachflächen zu erzeugen vermögen. 29% des Potentials stammt aus Anlagen zwischen 20 und 50 kWp und 25% des Potentials decken die noch grösseren Anlagen auf Mehrfamilienhäusern und gewerblichen Bauten ab.

Diese grösseren PV-Dach-Anlagen lassen sich effizienter bauen als kleine Anlagen und führen deshalb auch zu wesentlich geringeren Strom-Gestehungskosten.

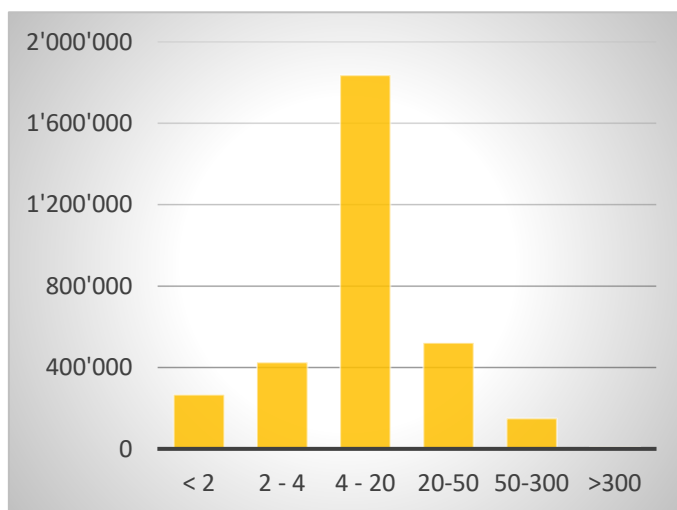


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der PV-Anlagengrössen in kWp im Dachflächenpotential. Nach oben ist die Anzahl Anlagen aufgetragen. (Datenquelle Sonnendach.ch gruppiert nach UUID mit 30% Pauschalabzug z.B. für Kamine, Dachaufbauten, usw.)

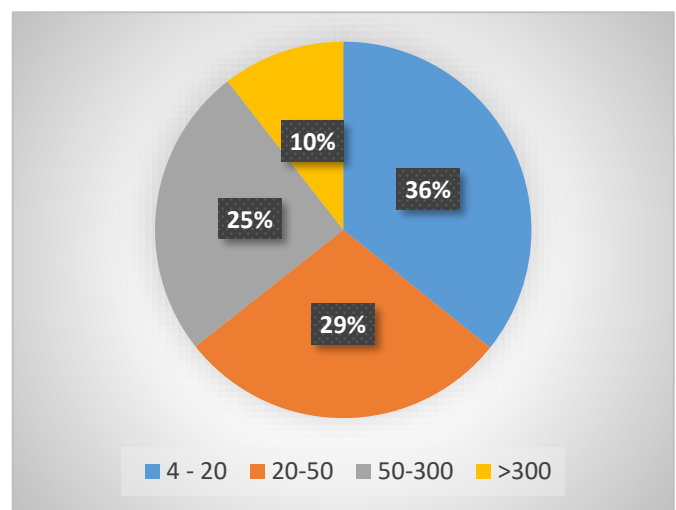


Abb. 5: Anteil am gesamten Dachflächenpotential (kWh pro Jahr) nach PV-Anlagengrössen in kWp. Anlagen mit einer Leistung < 4 kWp sind aufgrund ihres geringen Anteils an der Stromproduktion nicht eingezeichnet.

Tabelle 2: Häufigkeit der jährlichen PV-Erträge im Dachflächenpotential (Datenquelle Sonnendach.ch gruppiert nach UUID mit 30% Pauschalabzug z.B. für Kamine, Dachaufbauten, usw.)

Kategorie [MWh]	Stromertrag [GWh]	Fläche [km ²]	Anzahl Anlagen
<2	329.31	2.01	266'052
2 - 4	1'232.27	7.45	424'647
4 - 20	18'945.87	111.15	1'835'675
20-50	15'156.99	90.48	520'871
50-300	13'302.59	80.61	149'218
>300	5'578.92	33.86	8'908
Total	54'545.96	325.57	3'205'371

4. Potentiale ausserhalb von Gebäuden

Studien zur Potentialabschätzung der PV-Produktion losgelöst von Gebäuden in der Schweiz sind bisher kaum veröffentlicht worden. Swissolar und Meteotest rechnen mit folgenden zusätzlichen Potentialen, welche in den nächsten 30 Jahre realisiert werden könnten (Remund et al., 2019):

Anlage	Potential in TWh	Fläche km ²
Strassen	2.5	16.2
Parkplätze	3.9	25.7
Autobahnböschungen	3.9	25.7
Summe:	10.3	67.6

Zu diesem **Potential auf vorhandenen Infrastrukturen von 10.3 TWh** pro Jahr kommt ein im Prinzip nur durch die Fläche der Schweiz begrenztes Potential an Freiflächenanlagen im Flachland und im Gebirge. Die Autoren der oben erwähnten Studie beziffern aufgrund von Überlegungen zur Nähe von Einspeisemöglichkeiten sowie unter Weglassung von Schutzgebieten, zwischen 1500 und 2500 m.ü.M. in den Alpen allerdings nur ein begrenztes Potential von 3.3 TWh (Remund et al., 2019). Darüber hinaus, könnten Potentiale auf weiteren, in dieser Studie nicht berücksichtigten Infrastrukturen, ausgeschöpft werden, siehe Kapitel 7.

5. Kosten für die PV-Anlagen

Die spezifischen Kosten in Franken pro kWp installierte Leistung einer PV-Anlage sind stark von der Anlagengrösse abhängig. Die Analyse von ca. 2'000 Angeboten und 400 Rechnungen für PV-Anlagen, welche im Jahr 2019 offeriert oder realisiert wurden, ergab eine grosse Streuung der spezifischen Kosten (Planair, 2020). Die Differenz zwischen Offerten und Rechnungen betrug bei kleineren Anlagen ca. 10%, bei grossen Anlagen ca. 3% (Planair, 2020). Die Zahlen erscheinen deshalb wirklichkeitsnah bzw. nicht durch unrealistische Angebote verfälscht zu sein.

In Anlehnung an diese Analyse wurden für das Jahr 2020 spezifische Kosten gemäss Tabelle 3 angenommen. Es sind keine Subventionen (KLEIV, GREIV) und keine Steuereinsparungen, usw. berücksichtigt. Diese spezifischen Kosten entsprechen somit dem vom Kunden an den PV-Installateur bezahlten Preis. Einfachheitshalber werden in diesem Bericht die Preise für alle PV-Anlagen im Jahr 2020 auf Gebäuden, anderen Infrastrukturen oder Freiflächen mit den durchschnittlichen spezifischen Kosten von Fr. 1'789 pro kWp berechnet. Dieser Wert ist sehr nahe an den Angaben aus der Strategie Solarbildung Schweiz, welche ein Marktvolumen von 640 Mio. Fr. für einen PV-Zubau von 350 MWp im Jahr 2020 abschätzte (Portmann et al., 2017, Seite 64). Dies ergibt ca. 2 % höhere durchschnittliche Kosten von Fr. 1'828 pro kWp.

Fraunhofer ISE rechnet mit einer Reduktion der Gestehungskosten von Solarstrom von 2020 bis 2050 um ca. 57% (Fraunhofer ISE, 2015). Die internationale Energieagentur IRENA erwartet von 2020 bis 2050 eine Reduktion der Gestehungskosten (LCOE) um ca. 62% (IRENA, 2019). Diese Vorhersagen entsprechen somit einer jährlichen Kostenreduktion von 3%. Diese jährliche Kostenreduktion wird auch in den nachfolgenden Überlegungen einbezogen.

Tabelle 3: Angenommene spezifische Kosten für unterschiedliche PV-Anlagengrössen im Jahr 2020. Zur Berechnung der durchschnittlichen spezifischen Kosten wurde die Kosten pro Kategorie mit dem Flächenpotential auf Dächern gemäss Sonnendach.ch gewichtet.

Kategorie [MWh]	Spez. Kosten [Fr./kWp]	Fläche [km ²]
2 - 4	3'000	7.45
4 - 20	2'500	111.15
20-50	1'700	90.48
50-300	1'200	80.61
>300	750	33.86
Durchschnitt	1'789	

6. Vergleich von Potential und Bedarf

Gemäss Tabelle 1 besteht im Szenario «Wachstum gemäss Bund» ein Bedarf von zusätzlichen 24.4 TWh PV-Strom pro Jahr bis 2030 bzw. 43.7 TWh PV-Strom pro Jahr bis 2050. Der erforderliche PV-Strom wurde mit relativ optimistischen Annahmen bezüglich der Realisierung von Strom-Effizienzmassnahmen und dem Ausbau der anderen Technologien zur Stromerzeugung (Windkraft, Wasserkraft, Biomasse) bestimmt. Diesem Bedarf an PV-Strom werden in Tabelle 4 die oben aufgezeigten Potentiale für PV-Strom gegenübergestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass finanzielle und personelle Ressourcen keine Engpässe darstellen (siehe Überlegungen in den Kapiteln 7 und 8) und dass die Potentiale bis 2030 bzw. 2050 vollständig umgesetzt werden können.

Abbildung 6 zeigt für beide Szenarien den Vergleich zwischen dem Bedarf an PV-Strom im Jahr 2050 mit der prognostizierten PV-Produktion unter der Annahme von unterschiedlichen Ausschöpfungsgraden des Potentials³. Selbst eine vollständige Ausschöpfung des PV-Potentials bis 2050 auf vorhandenen Infrastrukturen könnte den Bedarf im Szenario «Wachstum gemäss Bund» nicht ganz abdecken. Im Szenario «Effizienz und Suffizienz» würde hingegen bereits eine 70%ige Ausschöpfung des Potentials auf Infrastrukturen oder eine vollständige Ausschöpfung des PV-Potentials an Gebäuden (Dachflächen und Fassaden) zur Deckung des Bedarfes ausreichen.

Dabei sind bisher nur die Jahresbilanzen des Strombedarfes und der Stromproduktion berücksichtigt worden. Bedingt durch den jahreszeitlichen Verlauf der PV-Produktion im Mittelland und dem hohen Anteil an PV-Strom, wird mit sehr grosser Wahrscheinlichkeit eine saisonale Stromspeicherung erforderlich werden. Unabhängig von der gewählten Speichertechnologie ist die Speicherung und Rückumwandlung mit Verlusten behaftet, sodass letztendlich der Strombedarf höher sein wird. Alle Massnahmen, welche den Strombedarf im Winter reduzieren (z.B. energetische Gebäudesanierungen), reduzieren den saisonalen Speicherbedarf. Ein forcierter Ausbau von Windkraft und von PV-Anlagen im Gebirge würde den saisonalen Speicherbedarf ebenfalls verkleinern. Anderenfalls werden je nach dem Wirkungsgrad der gewählten Speichertechnologie wesentlich grössere freie Flächen mit PV-Anlagen bedeckt werden müssen.

Zudem ist hier weder ein allfälliger zusätzlicher Strombedarf durch die Dekarbonisierung in der Industrie oder Landwirtschaft, noch für die Substitution von Flugtreibstoffen berücksichtigt worden.

³ Damit wird das Verhältnis zwischen der prognostizierten PV-Stromproduktion und dem PV-Potential bezeichnet.

Damit wird offensichtlich, dass konsequente Effizienz- und Suffizienz-Massnahmen zur Reduktion des Strombedarfs und/oder PV-Anlagen auf Freiflächen oder weiteren Infrastrukturflächen notwendig sein werden, um den Strombedarf der Schweiz im Jahr 2050 in der Jahresbilanz zu decken.

Tabelle 4: Vergleich zwischen dem Bedarf pro Szenario und den Potentialen an PV-Strom auf bestehenden Infrastrukturen (Dachflächen, Fassaden, Parkplätze, Strassen, Böschungen).

	im Jahr 2030	2050
Produktionspotentiale von PV-Strom:		
PV auf Dachflächen	24.5	24.5 TWh
PV an Fassaden	8	8 TWh
PV auf Parkplätzen, Strassen, Böschungen	10.3	10.3 TWh
Zwischensumme Potential PV-Strom	42.8	42.8 TWh
Szenario «Wachstum Bund»		
Strombedarf aus PV	24.4	43.7 TWh
Potential - Bedarf	18.4	- 0.9 TWh
Szenario «Effizienz und Suffizienz»		
Strombedarf aus PV	16.4	31.1 TWh
Potential - Bedarf	26.4	11.7 TWh

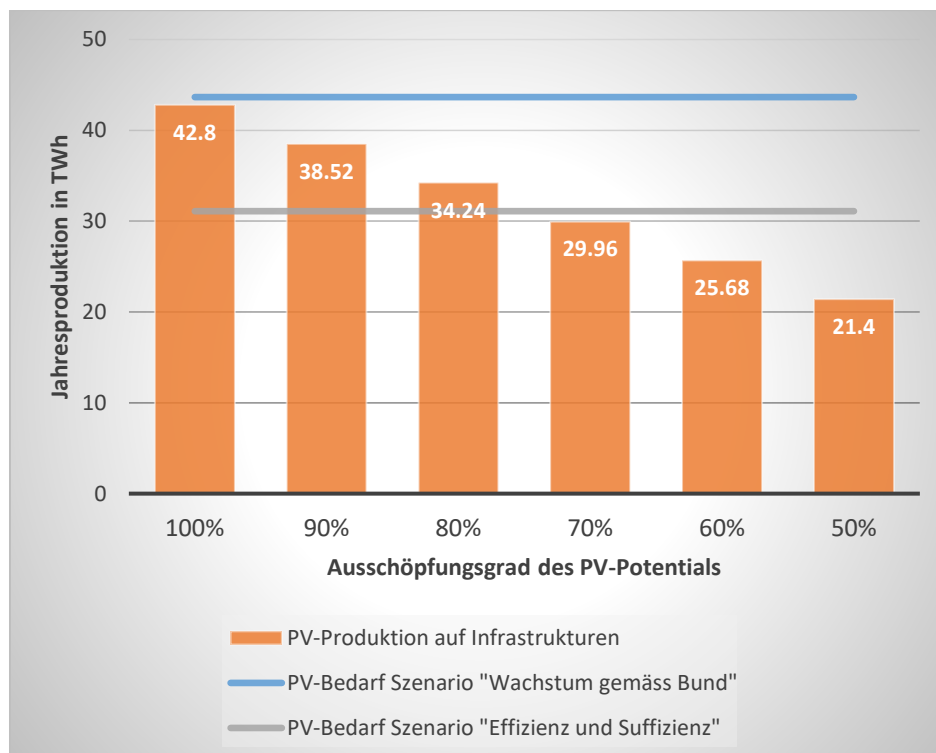


Abb. 6: PV-Strombedarf für das Jahr 2050 (Szenario «Wachstum gemäss Bund» blaue Linie bzw. Szenario «Effizienz und Suffizienz» graue Linie) und PV-Produktion in Abhängigkeit davon, wie stark das PV-Potential auf vorhandenen Infrastrukturen effektiv ausgeschöpft wird.

7. Vorschlag für den Ausbau der PV-Produktion in der Schweiz

Nachfolgend wird aufgezeigt, dass die genannten PV-Potentiale in relativ kurzer Zeit realisiert werden könnten. Sowohl bezüglich Zeit als auch bezüglich Kosten am effizientesten erfolgt der Zubau, wenn primär das Potential für *grosse* PV-Anlagen ausgeschöpft wird. Grosse PV-Anlagen lassen sich auf Gebäuden von Industrie und Gewerbe auf Landwirtschaftsgebäuden und auf sehr grossen Mehrfamilienhäusern realisieren. Ein weiteres Potential für grosse PV-Anlagen besteht in der Überdachung von bereits versiegelten Flächen, wie z.B. Parkplätze, Lärmschutzwände, Perrons, Staumauern, auf Stauseen, Strassen, usw. Zudem besteht ein fast beliebig grosses Potential für grosse PV-Anlagen auf Freiflächen, zum Beispiel im Gebirge oder in Kombination mit Landwirtschaft (Agro-Photovoltaik).

7.1 Personalbedarf bzw. Ausbildung von zusätzlichem Personal

Aktuell beträgt die jährliche Zubaurate an PV-Leistung ca. 350 MW (Hostettler, 2019). Für einen rascheren Zubau müssen zusätzliche Fachkräfte – insbesondere PV-Planer – ausgebildet werden. Die Rekrutierung und Ausbildung benötigt Zeit, was als wichtigster limitierender Faktor betrachtet wird.

Die im Kapitel «Kosten für die PV-Anlagen» hergeleiteten durchschnittlichen spezifischen Kosten einer PV-Anlage entsprechen gemäss den Analysen von Planair einer PV-Anlage mit ca. 30 kWp im Jahr 2020 (Planair, 2020). Für eine solche Anlagengrösse betragen die Arbeitskosten gemäss Planair ca. 33% der Offertkosten (administrative Kosten 8% und Installationskosten 25%). Es ist allerdings anzunehmen, dass in den Kosten für die Sicherheit auf dem Dach (10%) und in den Kosten für die Logistik (2%) ebenfalls Arbeitskosten enthalten sind. Somit dürften die erwähnten 33% eher eine Untergrenze für den Anteil Arbeitskosten an den Investitionskosten einer PV-Anlage darstellen.

Eine Untersuchung der Internationalen Energieagentur (IEA) bezifferte für das Jahr 2018 die Planungs- und Installationskosten bei Anlagen von 5 bis 10 kWp in der Grössenordnung von 32% bis 55% der Investitionskosten, bei PV-Anlagen grösser als 1 MW beträgt ihr Anteil 25% bis 41% (Leguay et al., 2019). Auf eine ähnliche Grössenordnung von 40% für Planung und Montage kam eine Untersuchung der ZHAW über die Wertschöpfung von PV-Anlagen (Sperr & Rohrer, 2017, 2018). In der Folge wird deshalb ein durchschnittlicher Kostenanteil für Arbeitsleistungen von 40% an den Investitionskosten angenommen.

Gemäss der «Strategie Solarbildung Schweiz» wird in der Solarbranche unterschieden zwischen Expertenwissen (3% der Beschäftigten), Fachwissen (25% der Beschäftigten) und Grundwissen (72% der Beschäftigten) (Portmann et al., 2017). Bei Offerten für PV-Anlagen wird normalerweise zwischen den Arbeitsstunden für die Planung bzw. für den Bau der Anlage unterschieden. Etwa 17% der Arbeitsstunden entfallen für die Planung, die restlichen 83% für den Bau der Anlage (Sperr & Rohrer, 2017, 2018). Nachfolgend wird deshalb davon ausgegangen, dass für 85% der Arbeiten eine 1-2-wöchige Anlehre genügt und somit nur 15% der Arbeiten durch gut ausgebildete Fachplaner erfolgt. Diese Fachplaner verfügen über eine solide technische Grundausbildung (Stufe Technikerschule oder Stufe Fachhochschule), eine etwa 2 Monate dauernde Spezialausbildung und zusätzlich mindestens ein halbes Jahr Arbeitserfahrung in der Planung von PV-Anlagen.

Bedingt durch die notwendige Schulung von zusätzlichen Fachplanern wird der PV-Ausbau bis 2030 auf ca. 27 TWh begrenzt (siehe Abbildung 7). Dabei wurde, wie im Kapitel 5 ausgeführt, von durchschnittlichen Investitionskosten einer PV-Anlage im Jahr 2020 von Fr. 1'789 pro kWp, einer zukünftigen Kostenreduktion der PV-Anlagen von 3% pro Jahr und einem Anteil der Montage- und Planungskosten an den Investitionskosten einer PV-Anlage von 40% ausgegangen (Sperr & Rohrer, 2017). Damit können die Kosten für die Arbeitsleistung bei Bau und Planung der PV-Anlagen berechnet werden. Das Bruttoeinkommen pro Vollzeitäquivalent für Planung und Montage beträgt in der PV-Branche Fr. 67'000 pro Jahr (Huemer,

2016). Lohnnebenkosten, Werkzeuge, Fahrzeuge, Büromiete, Administration, usw. werden mit dem Faktor 1.5 berücksichtigt, sodass sich verrechnete Kosten von Fr. 100'000 pro Vollzeitäquivalent (VZÄ) ergeben. Gemäss der Strategie Solarbildung Schweiz beträgt der jährliche Umsatz pro VZÄ in der PV-Branche im Jahr 2020 230'000 Fr. und der Anteil «Material und weitere Kosten» beträgt 45% (Portmann et al., 2017). Somit ergeben sich die verrechneten Kosten pro VZÄ von Fr. 126'500. Da der Umfang der Gruppe «Material und weitere Kosten» nicht weiter spezifiziert ist, wird im Folgenden mit dem tieferen Wert von Fr. 100'000 pro VZÄ gerechnet.

Die Kosten für Fachplaner machen, wie oben erwähnt, 15% der gesamten Arbeitskosten bei Planung und Bau einer PV-Anlage aus. Damit wurde die Anzahl benötigter PV-Fachplaner in Abbildung 8 bestimmt. Dies führt zu einer Erhöhung des Bedarfs an PV-Fachplanern von heute ca. 420 Vollzeitäquivalenten auf ca. 2'500 Vollzeitäquivalente bis 2025 (siehe Abbildung 8). Insgesamt ergibt sich somit ein Bedarf von:

- ca. 2'500 Fachplaner
- ca. 14'000 Montage-Personen

Die Ausbildung von 2'500 Fachplanern innert 5 Jahren stellt kein unüberwindbares Problem dar. Es stellt sich höchstens die Frage, ob so viele Personen für diesen Beruf motiviert werden können. Das Montagepersonal könnte temporär zum Beispiel zusätzlich durch die Armee, Zivildienst und durch temporär Angestellte aus dem sekundären Arbeitsmarkt (z.B. Arbeitslose oder Asylsuchende) ergänzt werden.

Zum Vergleich: In der Schweiz gibt es derzeit ca. 5 Mio. Beschäftigte. Im Sektor G «Handel, Instandhaltung und Rep. von Kraftfahrzeugen» werden beim Übergang zur Elektromobilität vermutlich einige Leute entlassen werden müssen. Aktuell sind dort in der Schweiz 603'000 Personen beschäftigt. Die oben genannten rund 20'000 Personen entsprechen 3.3% der Beschäftigten im Sektor G.

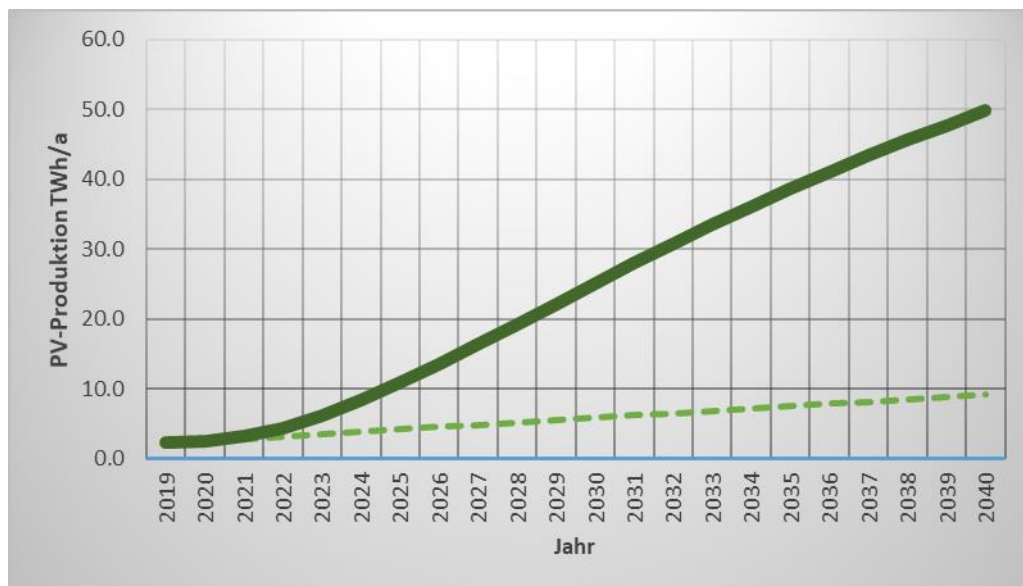


Abb. 7: Vorschlag für einen raschen Ausbau der PV-Produktion bis 2040. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf des PV-Ausbaus ohne weitere Massnahmen («weiter wie bisher»).

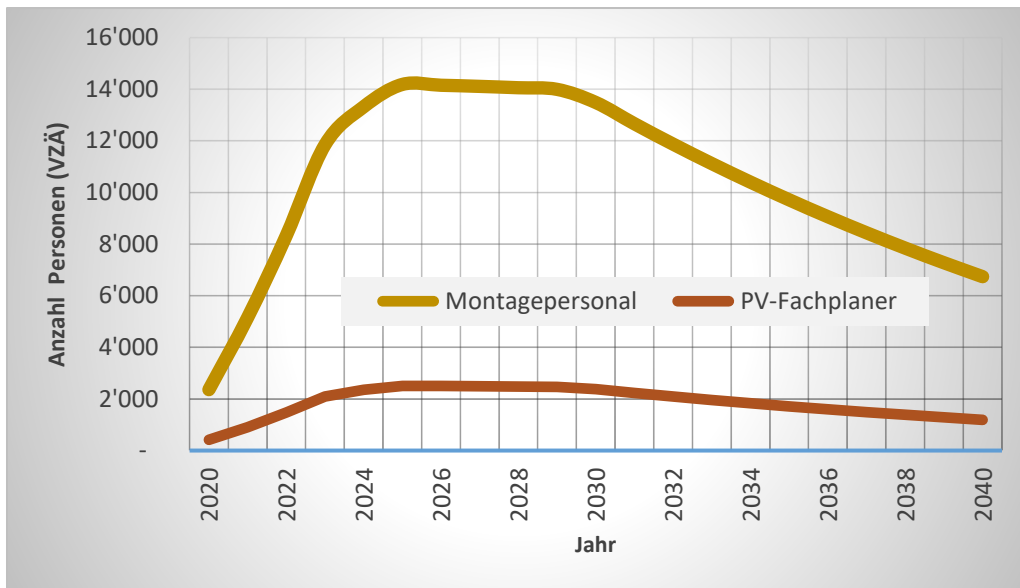


Abb. 8: Anzahl benötigte PV-Fachplaner für einen Ausbau der Stromproduktion aus PV gemäss Abb. 7.

7.2 Jobmotor Photovoltaik

Ein rascher Ausbau der Photovoltaik in der Schweiz eignet sich auch zur Schaffung von Arbeitsplätzen im Bausektor. Innerhalb von zwei Jahren könnten 7'000, innerhalb von fünf Jahren 14'000 neue Arbeitsplätze geschaffen werden, siehe Tabelle 5 sowie Abbildung 8. Diese Zahl von insgesamt rund 16'500 Arbeitsplätzen würde erst nach 2030 wieder leicht abnehmen: Im Ausbau-Szenario gemäss Abbildung 7 und 6 beträgt die Abnahme ab 2031 bis 2040 jeweils ca. 6 bis 7% pro Jahr, was etwa der Hälfte der durchschnittlichen Fluktuationsrate der Arbeitnehmenden in der Schweiz von 12.8% im Jahr 2018 entspricht (BFS, 2019). Der PV-Ausbau wird aber auch nach dem Jahr 2040 noch weitergehen, damit der in diesem Bericht nicht betrachtete, zusätzliche Strombedarf aus der Dekarbonisierung der anderen Sektoren (Industrie, Landwirtschaft, Kehrrechtverbrennung, Flugverkehr, usw.) sowie die Speicherverluste möglichst mit inländischer Produktion gedeckt werden können. Nach 2040 wird auch der Ersatz von älteren PV-Anlagen zunehmend an Bedeutung gewinnen, sodass sich die Anzahl Arbeitsplätze in der PV-Branche auf wesentlich höherem Niveau als heute einpendeln wird.

Falls es möglich ist, mehr als 500 zusätzliche PV-Fachplaner pro Jahr auszubilden, könnten auch mehr Stellen in kürzerer Zeit geschaffen werden. Pro Stelle für Fachplaner entstehen bei der aktuellen Aufteilung der PV-Anlagengrössen durchschnittlich ca. 5.7 Arbeitsplätze für Montagepersonal. Wenn der Anteil von grossen PV-Anlagen erhöht wird, können pro PV-Fachplaner auch wesentlich mehr Stellen für Montagepersonen geschaffen werden.

Tabelle 5: Ausbau der Photovoltaik in von 2020 bis 2026. Durch die Ausbildung von 500 PV-Fachplanern pro Jahr können innerhalb von 4 bis 5 Jahren insgesamt ca. 14'000 neue Arbeitsplätze im Bausektor geschaffen werden.

Jahr	Zubau MW	Ertrag in TWh	Kosten pro kWp	Vollzeitstellen	Montagepersonal	Fachplaner
2019	350	2.2	1'789	2'505	2'129	376
2020	400	2.6	1'735	2'777	2'360	416
2021	900	3.2	1'683	6'060	5'151	909
2022	1500	4.3	1'633	9'797	8'327	1'469
2023	2200	6.1	1'584	13'937	11'847	2'091
2024	2550	8.4	1'536	15'670	13'320	2'351
2025	2800	10.9	1'490	16'690	14'187	2'504
2026	2880	13.6	1'445	16'652	14'154	2'498

8. Politische Massnahmen

Neue PV-Anlagen werden heute primär über den Eigenverbrauch finanziert, vor allem weil für den selber produzierten und vor Ort verbrauchten Strom keine Netzabgaben bezahlt werden müssen. Der Anreiz zum Verbrauch vor Ort ist sinnvoll. Er führt aber dazu, dass in jenen Fällen, in denen nur ein geringer oder gar kein Eigenverbrauch des PV-Stromes möglich ist, derzeit praktisch kein Ausbau mehr stattfindet. Zudem führt diese Art der Förderung tendenziell zum Bau von PV-Anlagen, welche grössere Dachflächen nur teilweise ausnutzen, um den Eigenverbrauch und damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.

Unter der Annahme, dass die Zubaurate von PV-Anlagen bei gleichbleibenden Fördermassnahmen im selben Rahmen wie heute bleibt, lässt sich bis 2030 ein Ausbau der PV-Produktion von heute 2.2 TWh auf 5.7 TWh bzw. bis 2050 auf 12.7 TWh realisieren. Diese erwartete PV-Produktion ist um den Faktor 3 bis 4 tiefer als der Bedarf in den beiden betrachteten Szenarien.

In Abbildung 6 wurde gezeigt, dass das Potential für Strom aus PV-Anlagen auf Infrastrukturen im Jahr 2050 im Szenario «Wachstum gemäss Bund» ungefähr dem Strombedarf in der Jahresbilanz entspricht. Um Freiflächen möglichst zu schonen, sollte deshalb ein maximaler Anteil des PV-Potentials auf Infrastrukturen auch wirklich umgesetzt werden. Eine sinnvolle Ergänzung und teilweise Alternative zu einem massiven PV-Ausbau wären Suffizienz- und Effizienz-Massnahmen zur Reduktion des Strombedarfs, wie zum Beispiel im Szenario «Effizienz und Suffizienz».

Sowohl eine (fast) vollständige Umsetzung des PV-Potentials auf Infrastrukturen als auch Effizienz- und Suffizienz-Massnahmen dürften sich kaum auf der Basis von Freiwilligkeit durch blosse Handlungsempfehlungen umsetzen lassen. Um einen Ausbau der PV-Produktion gemäss Abbildung 7 realisieren zu können, sind deshalb wesentlich weitergehende Massnahmen erforderlich. Ideen zur Ergänzung der heutigen Massnahmen insb. betreffend die Finanzierung werden in der Politik diskutiert und sollen hier deshalb nicht wiederholt werden.

Nachfolgend als Ergänzung zwei konkrete Vorschläge als Diskussionsgrundlage, wie ein gewisser Druck ausgeübt und somit eine rasche Umsetzung erzielt werden könnte:

8.1 Solarpflicht für alle geeigneten Gebäude

Alle Gebäude, deren Dach gemäss Sonnendach.ch die Eignung mittel, gut oder sehr gut aufweist, müssen innert 10 Jahren mit einer PV-Anlage ausgerüstet werden. Für denkmalgeschützte oder Gebäude im Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder sollen Ausnahmen möglich sein. Die Grösse der Anlage richtet sich nach der Dachgrösse, nicht nach dem Eigenbedarf. Für PV-Anlagen < 500 kWp gibt es während den ersten 15 Jahren einen minimalen Rückspeisetarif von zum Beispiel 10 Rp/kWh inkl. Herkunftsnachweis (HKN).

Als Anreiz zahlen die betroffenen Gebäudebesitzer eine jährliche Abgabe pro *Quadratmeter nicht für PV genutzte* Dachfläche mit oben erwähnter Qualität. Die Höhe der jährlichen Abgabe soll in den ersten 10 Jahren kontinuierlich steigen. Dies würde einen Anreiz für den raschen Bau einer PV-Anlage darstellen. Die jährliche Abgabe darf zudem nicht auf allfällige Mieter überwältzt werden.

Alle 2 Jahre kann die Abgabe zusätzlich erhöht werden, falls der Zielpfad des erforderlichen Zubaus an PV-Anlagen nicht erreicht wird. Der Einfachheit halber könnte die PV-Abgabe für die Dachfläche alternativ auch unabhängig von der Eignung für PV-Anlagen eingefordert werden.

Die Abgabe könnte im Jahr 2020 auf 0 Fr./m² festgelegt werden und danach linear steigend bis 2030 auf 20 Fr. /m² erhöht werden. Erklärung für die Höhe der Abgabe: Pro Quadratmeter könnte (auf einem Schrägdach) 200 W PV-Leistung installiert werden, was zu einem Jahresertrag von rund 200 kWh führen würde. Dieser Ertrag muss stattdessen bei einer anderen PV-Anlage zum minimalen Rückspeisetarif von 10 Rp/kWh eingekauft werden. Dies ergibt den Vorschlag für den Ansatz von 20 Franken pro Jahr und Quadratmeter (200 kWh à Fr. 0.10).

Das vorgeschlagene Vorgehen kennt die Schweiz übrigens in analoger Weise von der 1963 im Zivilschutzgesetz eingeführten Pflicht zum Bau von Schutzräumen (Zivilschutzkellern): Bis vor nicht allzu langer Zeit musste jedes Gebäude in der Schweiz über einen Schutzraum verfügen oder sich in einem anderen Schutzraum «einkaufen». Sofern die Gemeinde nicht über genügend Schutzräume verfügt, besteht diese Pflicht heute noch (BABS, o. J.).

Solche Vorgaben wären somit nichts grundsätzlich Neues für die Schweiz. Sogar die zusätzlichen Kosten von ca. 20'000 Franken für den Bau des Schutzraums in einem Einfamilienhaus liegen in derselben Grössenordnung wie der Bau einer PV-Anlage.

8.2 Kantone in die Pflicht nehmen

Für den erforderlichen Ausbau der *neuen* erneuerbaren Energien wird für die Zeit zwischen 2020 und 2035 ein Zielpfad mit der jährlich neu zu erstellenden Produktionsmenge und des jeweiligen Anteils an Winterstrom (November bis Februar) erstellt. Der Winterstrom kann entweder aus einer Produktionsanlage oder aus einem Speicher stammen. Die bisherige Produktion an erneuerbarer Energie wird nicht angerechnet, da diese schon durch andere Mechanismen finanziert wird, zum Beispiel durch Wasserzinsen.

Der erforderliche Ausbau von neuen erneuerbaren Energien gemäss Zielpfad wird auf die Kantone verteilt. Als Schlüssel soll die Anzahl Einwohner pro Kanton dienen, jedoch wären auch andere Schlüssel vorstellbar, wie zum Beispiel die versiegelte Fläche pro Kanton. Für die neu zugebaute Produktion werden in einem Markt handelbare Zertifikate vergeben. Kantone, welche das Ausbauziel verfehlen, müssen von anderen Kantonen mit Übererfüllung Zertifikate abkaufen (notfalls Strafzahlung an den Bund). Dadurch soll für die Kantone ein Anreiz geschaffen werden, z.B. Windgebiete auszuscheiden und Windkraftanlagen zu erstellen oder Verpflichtungen zum Bau von PV-Anlagen in die kantonalen Energiegesetze aufzunehmen.

Wie der Ausbau gefördert wird, bleibt den einzelnen Kantonen überlassen. Kantone mit schlecht wirksamen Fördermassnahmen zahlen durch den Zertifikatehandel an Kantone mit erfolgreichem Fördersystem.

Evtl. könnte man parallel dazu den kantonalen Finanzausgleich halbieren, um die Unterstützung der reichen Kantone für den Vorschlag zu sichern und dessen politische Machbarkeit zu erhöhen.

8.3 Ausbildung von Arbeitskräften

Unabhängig von den gewählten Massnahmen zur Beschleunigung des Baus von PV-Anlagen werden zusätzliche Arbeitskräfte in der Branche benötigt. Wie in Kapitel 7.1 diskutiert, stellt dabei die Ausbildung von PV-Fachplanern der Engpass dar. Solche Fachplaner werden heute durch Fachhochschulen, Technikerschulen und Branchenorganisationen in Zusammenarbeit mit PV-Installationsfirmen ausgebildet.

Um während den nächsten vier bis fünf Jahren jeweils jährlich ca. 500 neue PV-Fachplaner ausbilden zu können, sollte diesen Ausbildungsstätten der diesbezügliche Auftrag erteilt und die entsprechenden finanziellen Mittel zur Verfügung gestellt werden.

Möglicherweise wäre auch eine ganz kurze Ausbildung (Anlehre) inklusive etwa 2 Wochen Training mit einem Abschlusszertifikat für Montagekräfte sinnvoll. Dies insbesondere dann, wenn nicht mehr benötigte Arbeitskräfte aus anderen Branchen oder aus dem sekundären Arbeitsmarkt eingesetzt werden sollen. Auch dafür müssten von der Politik die notwendigen finanziellen Mittel zur Verfügung gestellt werden.

9. Literaturverzeichnis

- Assouline, D., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2017). Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. *Solar Energy*, *141*, 278–296.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.045>
- Assouline, D., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2018). Large-scale rooftop solar photovoltaic technical potential estimation using Random Forests. *Applied Energy*, *217*, 189–211.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.118>
- BABS. (o. J.). *Schutzbauten*. Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS. Abgerufen 8. Juni 2020, von <https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/schutzbauten.html>
- BFE. (2018a). *Wasserkraft*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html>
- BFE. (2018b). *Sonnendach.ch macht das Solarenergiepotenzial der Schweizer Hausdächer von rund 50 TWh/Jahr sichtbar*. Medienmitteilung vom 26.9.2018.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-72298.html>
- BFE. (2019). *Wasserkraftpotenzial der Schweiz—Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2020*. BFE.
- BFS. (2019). *Arbeitsmarktindikatoren 2019*. Bundesamt für Statistik BFS, Schweizerische Eidgenossenschaft.
- Bundesamt für Energie. (o. J.). *Wie viel Strom oder Wärme kann mein Dach produzieren?* sonnendach.ch. Abgerufen 17. Oktober 2019, von <https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/sonnendach/>
- Bundesamt für Energie BFE. (2019). *Energiestrategie 2050: Monitoring-Bericht 2019 Kurzfassung*.
- Bundesrat. (2019). *Bundesrat will bis 2050 eine klimaneutrale Schweiz*. Medienmitteilung vom 28.8.2019. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-76206.html>
- Eymann, L., Rohrer, J., & Stucki, M. (2014). *Energieverbrauch der Schweizer Kantone: Endenergieverbrauch und Mittelabfluss durch den Energie-Import*.
<https://doi.org/10.21256/zhaw-124>
- Fraunhofer ISE. (2015). *Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems*. Study on behalf of Agora Energiewende.
- Gutschner, M., Gnos, S., & Nowak, S. (2010). *Potenzialabschätzung für Sonnenkollektoren im Wohngebäudepark: Regionalstudie Wohngebäudepark des Kantons Freiburg und Reevaluation des Potenzials in der Stadt Zürich*. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Hostettler, T. (2019). *Markterhebung Sonnenenergie 2018*. Swissolar.
https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Markterhebung/Marktumfrage_2018.pdf
- Huemer, S. (2016). *Einflussfaktoren auf die regionale Wertschöpfung am Beispiel von PV-Anlagen (Tutorial 3 im MSc-Studiengang unter der Leitung von Rohrer, J. & Sperr, N.)*. ZHAW, Wädenswil.
- IRENA. (2019). *Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

- Leguay, G., Heiniger, L.-P., & Perret, L. (2019). *National Survey Report of PV Power Applications in Switzerland 2018*. IEA PVPS TCP.
- Nowak, S., & Gutschner, M. (2011). *Hintergrundmaterial Photovoltaik und Windkraft zum a+ Bericht «Lösungsansätze im Konfliktfeld erneuerbare Energien und Raumnutzung»*.
- Nowak, S., Gutschner, M., & Gnos, S. (2007). *Potenzialabschätzung für Sonnenkollektoren in der Stadt Zürich*. NET Nowak Energie & Technologie AG.
- Planair. (2020). *Rapport « Observation du marché photovoltaïque 2019 »* (noch nicht veröffentlicht).
- Portmann, M., Galvagno-Erny, D., Lorenz, P., Schacher, D., & Heinrich, R. (2019). *Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden*. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Portmann, M., Lorenz, P., Hüsler, P., & Farrag, N. (2017). *Strategie Solarbildung Schweiz* (S. 80). Bundesamt für Energie (BFE).
- Remund, J., Albrecht, S., & Stickerberger, D. (2019). *Das Schweizer PV-Potential basierend auf jedem Gebäude*. Meteotest & Swissolar.
https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Tagungen/PV-Tagung_2019/Medien/190325Solarpotenzial_CH_JanRemund_lang.pdf
- Rohrer, J. (2019, April 25). Netto-Null bis 2030: Die Klimabewegung hat recht! *Südostschweiz*, 16.
- Rohrer, J., & Sperr, N. (2018). Die Folgen der Dekarbonisierung des Energiesystems auf die Schweizer Stromversorgung. *Schriftenreihe Erneuerbare Energien, Bodenökologie und Ökotechnologie, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften*. <https://doi.org/10.21256/zhaw-4826>
- Sperr, N., & Rohrer, J. (2017). *Wertschöpfung von Photovoltaik-Anlagen*. ZHAW Wädenswil.
- Sperr, N., & Rohrer, J. (2018, April 19). *Wertschöpfung von PV-Anlagen in der Schweiz*. 16. Nationale Photovoltaik-Tagung 2018, Bern, 19./20. April 2018. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3604>
- Sperr, N., & Rohrer, J. (2019a). *Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems*. 17. Nationale Photovoltaik-Tagung 2019, Bern, 26.-27. März 2019. <https://doi.org/10.21256/zhaw-3325>
- Sperr, N., & Rohrer, J. (2019b). *Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems—Beschreibung des interaktiven Dekarbonisierungs-Rechners (Prototyp)*. Forschungsgruppe Erneuerbare Energien, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen IUNR (unveröffentlicht).
- VSE. (2018). *Strom aus Biomasse*. VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen.
- Walch, A., Castello, R., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2020). Big data mining for the estimation of hourly rooftop photovoltaic potential and its uncertainty. *Applied Energy*, 262, 114404. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114404>
- Walch, A., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2019). A critical comparison of methods to estimate solar rooftop photovoltaic potential in Switzerland. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012035>
- Wüthrich, P., Notter, B., Heldstab, J., & Keller, M. (2017). *Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050, Szenarien für den Strassenverkehr*. infras im Auftrag des BAFU.