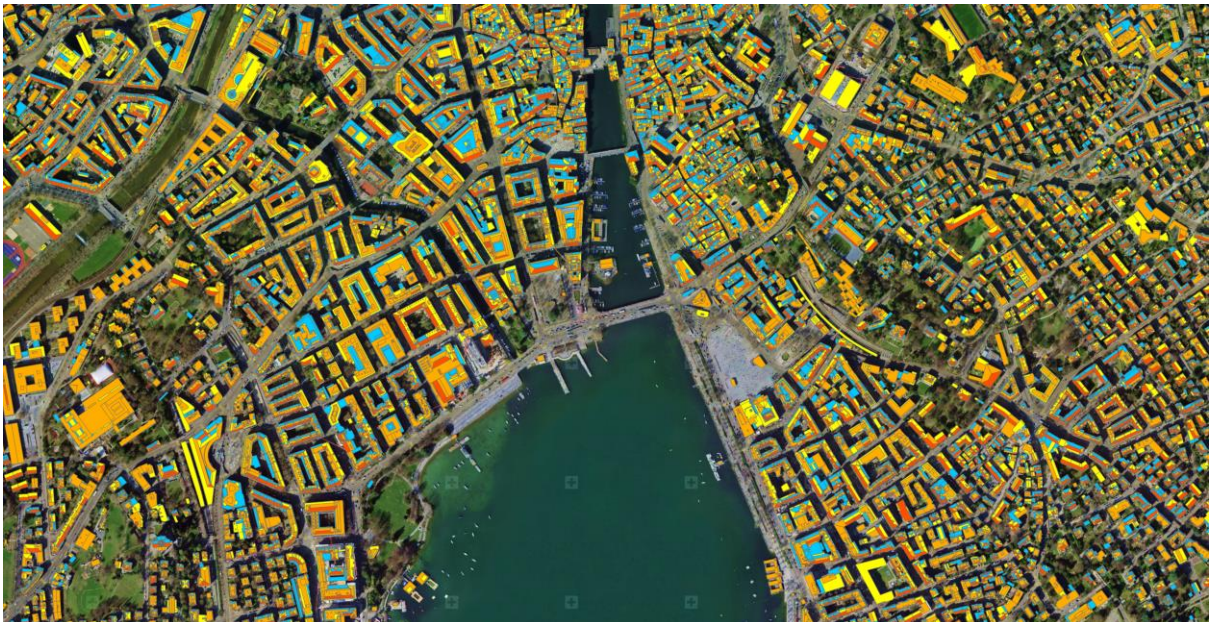


# Das Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern

Eine Analyse anhand von Sonnendach.ch



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

<https://doi.org/10.21256/zhaw-2652>

Wädenswil, Januar 2021

Autoren: Niccolò Moro, David Sauter, Sven Strebler, Jürg Rohrer

Forschungsgruppe Erneuerbare Energien, IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Wädenswil

Titelbild: Sonnendach.ch (BFE, o. J.)

## Zusammenfassung

Das Bundesamt für Energie (BFE) schätzt das Produktionspotenzial von Photovoltaikanlagen auf Dächern schweizweit auf 50 TWh pro Jahr (BFE, 2018). Dabei stützt es sich auf die Berechnungen einer Studie von Portmann et al. (2019), welche auf Daten von Sonnendach.ch basiert. Mehrere andere Studien errechneten jedoch ein deutlich tieferes Potenzial zwischen 16.3 und 24.6 TWh pro Jahr (Assouline et al., 2018; Walch et al., 2020). Der Hauptgrund für die Abweichung wird in der unterschiedlichen Schätzung der zur PV-Produktion nutzbaren Dachfläche vermutet (Walch et al., 2019).

In dieser Analyse werden deshalb anhand der manuellen Modulbelegung der Dächer von 99 zufällig ausgewählten Gebäuden mit insgesamt 690 Teildachflächen aus zwei Quartieren im Kanton Zürich sogenannte Reduktionsfaktoren bestimmt. Ein Reduktionsfaktor entspricht dem Anteil der installierbaren PV-Modulfläche an der gesamten Dachfläche. Wir berücksichtigen dabei sowohl technische als auch gewisse ökonomische und soziale bzw. ästhetische Randbedingungen. So werden Dachflächen, welche kleiner als 10 m<sup>2</sup> sind oder eine mittlere jährliche Sonneneinstrahlung von unter 1000 kWh/m<sup>2</sup> haben, als ökonomisch ungeeignet erachtet. Dies entspricht dem Vorgehen von Sonnendach.ch zur Bestimmung der kommunalen PV-Potentiale auf Dächern. Zudem wurden in unserer Analyse Teilflächen mit weniger als drei aneinander angrenzenden PV-Modulen aus ästhetischen Gründen ausgeschlossen.

Es zeigte sich, dass der Reduktionsfaktor nur von der Dachart (Flach- oder Schrägdach) und nicht von der Gebäudeart (Unterteilung in Mehrfamilienhäuser oder andere Gebäude) abhängt. Bezieht man den Reduktionsfaktor auf das oben erwähnte ökonomische Potential (gut, sehr gut und ausgezeichnet geeignete Dachflächen gemäss Sonnendach.ch mit einer Fläche von mindestens 10m<sup>2</sup>), so beträgt der Reduktionsfaktor, das heisst das Verhältnis der für PV-Module ausnutzbaren Fläche und der ökonomisch geeigneten Dachfläche 39 % bei Flachdächern und 56 % bei Schrägdächern. Gewichtet man diese beiden Prozentwerte mit den jeweiligen Anteilen der ökonomisch geeigneten Flach- bzw. Schrägdach-Flächen gemäss Sonnendach.ch in der gesamten Schweiz, so ergibt sich ein gemittelter Reduktionsfaktor von 50 %. Zur Abschätzung eines akkuraten Reduktionsfaktors erwies sich eine Stichprobengrösse von 120 verschiedenen Dachflächen als ausreichend.

Basierend auf den Rohdaten von Sonnendach.ch und den von uns ermittelten Reduktionsfaktoren wurde eine für PV-Anlagen in der Schweiz verfügbare Dachfläche von 231 km<sup>2</sup> ermittelt. Mit einem durchschnittlichen Modulwirkungsgrad von 17 % entspricht dies einem Potenzial von 38.8 TWh pro Jahr. Dabei stellt der durchschnittliche Modulwirkungsgrad aller installierten PV-Anlagen eine Unsicherheit dar, welche in den bisherigen Potenzialabschätzungen meist nicht thematisiert wurde. Wird der durchschnittliche Modulwirkungsgrad zum Beispiel von 17 % auf 20 % erhöht, so erhöht sich das Potenzial entsprechend auf 45.6 TWh pro Jahr.

Im Vergleich mit dem BFE sind unsere Potential-Schätzungen für PV-Strom auf Dächern somit je nach eingesetztem Modul-Wirkungsgrad um 22 % bzw. 9 % tiefer.

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Zusammenfassung.....   | 1  |
| 1 Einleitung.....  | 3  |
| 2 Methodik.....  | 4  |
| 2.1 Datengrundlage.....  | 4  |
| 2.2 Gebäude- und Dachflächenauswahl.....   | 4  |
| 2.3 Modulbelegung der Dächer.....  | 4  |
| 2.4 Bestimmung der Reduktionsfaktoren .....  | 5  |
| 2.5 Potenzialberechnung.....   | 6  |
| 3 Resultate.....   | 8  |
| 3.1 Ausnutzungsgrad der Dachflächen in der Stichprobe .....                                    | 8  |
| 3.2 Reduktionsfaktoren und Solarstrompotenzial auf Dächern.....                                | 9  |
| 4 Diskussion.....  | 11 |
| 4.1 Reduktionsfaktoren .....   | 11 |
| 4.1.1 Vergleich der Reduktionsfaktoren und der verfügbaren Dachfläche mit anderen Studien..... | 11 |
| 4.1.2 Abhängigkeit der Reduktionsfaktoren von der Stichprobengrösse .....                      | 13 |
| 4.2 Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern .....  | 15 |
| 4.2.1 Einfluss des Modulwirkungsgrads .....  | 15 |
| 4.2.2 Einfluss der Definition der ökonomisch geeigneten Dachflächen .....                      | 15 |
| 4.2.3 Vergleich mit Potenzialabschätzungen anderen Studien und mit der Schätzung des BFE ..... | 16 |
| 5 Fazit .....  | 19 |
| 6 Quellenverzeichnis .....   | 20 |
| 7 Anhang .....   | 21 |
| 7.1 Anhang A: Parameter für die Dachbelegung mit dem K2-Tool .....                             | 21 |
| 7.2 Anhang B: Beispiele von Dachbelegungen .....   | 22 |

# 1 Einleitung

Die Stromversorgung der Schweiz befindet sich in einem grossen Umbau. Gemäss der Energiestrategie 2050 bzw. den Energieperspektiven 2050+ sollen in naher Zukunft nicht nur die Kernkraftwerke vom Netz genommen werden, sondern auch ein Grossteil der fossilen Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Die steigende Anzahl von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen wird den Strombedarf zusätzlich erhöhen. Das grösste Potenzial für erneuerbare Energien wird im grossflächigen Einsatz von dezentralisierter Photovoltaik (PV) vermutet (BFE, 2020b). Vor allem auf Dächern liesse sich so sehr viel Strom produzieren ohne zusätzlichen Platz in Anspruch zu nehmen.

Der Bundesrat erwartet beim Strom ab dem Jahr 2035 eine Produktionslücke von ca. 25 TWh/a, wovon 15 TWh/a durch PV-Anlagen gedeckt werden sollen (BFE, 2020b). Bis 2050 sollen sogar 34 TWh/a von PV-Anlagen produziert werden (BFE, 2020b). Berücksichtigt man die Energieverluste durch die Energiespeicherung und durch allfälliges Peak-Shaving, so ist die benötigte Strommenge noch höher.

Um wirkungsvolle politische Massnahmen für den PV-Ausbau auszuarbeiten, sind zuverlässige Potenzialabschätzungen notwendig. Die bisher berechneten Potenziale von PV-Anlagen auf Dächern unterscheiden sich jedoch deutlich. Portmann et al. (2019), sowie Swissolar (Remund et al., 2019) schätzen das Potenzial auf 53.4, resp. auf 49.1 TWh/a. Zwei computergestützte Abschätzungen der EPFL berechneten deutlich tiefere Potenziale von 16.3 bzw. 24.6 TWh/a (Assouline et al., 2018; Walch et al., 2020). Ein Hauptgrund für diese grossen Unterschiede wird in der Abschätzung der für PV verfügbaren Dachfläche vermutet (Walch et al., 2020). Das BFE geht von einem Potenzial von 50 TWh/a aus und stützt sich dabei auf die Berechnungen von Portmann et al. (2019). Die offizielle Potenzialschätzung orientiert sich somit am Maximum der verschiedenen Studien.

In diesem Bericht berechnen wir das realisierbare Potenzial von PV-Anlagen auf Schweizer Dächern basierend auf den Rohdaten des Sonnendach.ch-Datensatzes. Wir berücksichtigen dabei sowohl technische als auch soziale und ökonomische Grenzen. Die technische Grenze wird durch die verfügbare Fläche für PV-Anlagen, sowie durch die Sonneneinstrahlung und den Modulwirkungsgrad gegeben. Modulanordnungen mit weniger als drei aneinandergereihten Modulen wurden aufgrund der Ästhetik nicht verwendet (soziale Grenze). Zudem wurden sehr kleine Dachflächen oder Dachflächen mit schwacher Sonneneinstrahlung als unökonomisch betrachtet (ökonomische Grenze). Ökologische Grenzen, z.B. in Form von Dachbegrünungen, wurden hingegen nicht berücksichtigt.

Zur Abschätzung der für die PV-Produktion verfügbaren Fläche werden sog. Reduktionsfaktoren bestimmt. Diese beschreiben jeweils den Anteil der mit PV-belegbaren Dachfläche an der gesamten Dachfläche. Um die Reduktionsfaktoren zu berechnen, belegten wir die Dachflächen von 99 zufällig ausgewählten Gebäuden in zwei Quartieren im Kanton Zürich mit einer PV-Anlage, welche die Dachflächen gut ausnutzt, aber auch ästhetischen und technischen Rahmenbedingungen genügt. Durch die zufällige Gebäudeauswahl wird sichergestellt, dass die Gebäudestichprobe möglichst repräsentativ für den gesamten Gebäudepark ist. Basierend auf unserer Stichprobe berechnen wir einen Reduktionsfaktor für die gesamte Stichprobe und für alle ökonomisch geeigneten Dachflächen der Stichprobe. In beiden Fällen berechnen wir zusätzlich Reduktionsfaktoren für verschiedene Dachkategorien. Dabei unterscheiden wir die Dachflächen in der Stichprobe sowohl bzgl. ihrer Neigung (Flach- oder Schrägdach) als auch bzgl. der Gebäudeart (MFH und nicht-MFH). Für alle Reduktionsfaktoren wird schlussendlich das entsprechende Solarstrompotenzial der Schweiz berechnet.

## 2 Methodik

### 2.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage bildet der Datensatz von Sonnendach.ch (BFE, o. J.). Dieser beinhaltet Daten zu den Dächern auf nahezu allen Gebäuden der Schweiz, wobei das Dach eines Gebäudes meist in mehrere Dachflächen unterteilt wird. Für unsere Auswertung wurde für alle Dachflächen jeweils die Fläche, die Neigung und der theoretische Stromertrag von Sonnendach.ch bezogen. Des Weiteren wurden den Gebäuden im Sonnendach.ch-Datensatz die Gebäudekategorien (GKAT) des eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) anhand des Eidgenössischen Gebäude-Identifikators (EGID) zugeordnet (Bundesamt für Statistik, o. J.). Dies ermöglicht die Unterscheidung der Gebäude in MFH und nicht-MFH.

### 2.2 Gebäude- und Dachflächenauswahl

Da die Datenauswertung, auf welcher dieser Bericht basiert, im erweiterten Rahmen des BFE-Projektes „SolSeasStore“ durchgeführt wurde, befinden sich die Gebäude in den im Projekt behandelten Zürcher Quartieren „Altstetten“ und „Looren (Witikon)“ (Sauter et al., 2020). Dadurch werden sowohl Gebäude in urbanen als auch in suburbanen Gebieten berücksichtigt. Ländliche Regionen wurden hingegen nicht miteinbezogen. Es wurden zufällig 99 Gebäude aus dem gesamten Gebäudepark beider Quartiere ausgewählt. Insgesamt wurden 81 Gebäude aus Altstetten und 18 Gebäude aus Looren untersucht. Auf diesen Gebäuden befinden sich gemäss Sonnendach.ch insgesamt 690 verschiedene Dachflächen.

Ursprünglich wurden 100 Gebäude zufällig ausgewählt. Eines dieser Gebäude verfügte über ein rundes Dach. In diesem Fall unterteilt Sonnendach.ch das Dach in viele kleine flache Flächen, um die Rundung zu approximieren. Da die Modulzuweisung zu einer konkreten Dachfläche in diesem Fall aufgrund der zu kleinen Dachflächen nicht möglich war, wurde dieses Gebäude nicht in die Auswertung miteinbezogen.

Die Dachflächen wurden bezüglich der möglichen PV-Produktion in ökonomisch geeignete und in ökonomisch ungeeignete Flächen unterschieden. Es wurde angenommen, dass alle Dachflächen welche kleiner als 10 m<sup>2</sup> sind oder gemäss Sonnendach.ch eine schlechtere Eignung als „gut“ haben (mittlere Einstrahlung < 1000 kWh/m<sup>2</sup>/Jahr), ökonomisch ungeeignet sind.

### 2.3 Modulbelegung der Dächer

Die Dachflächen der Gebäude wurden in einem ersten Schritt mit dem Modulbelegungstool „K2 Base“ belegt (K2 Systems GmbH, 2020). Die einzelnen Dachflächen und allenfalls Hindernisse werden dabei manuell auf Satellitenbildern markiert. Das Tool belegt anschliessend alle eingezeichneten Dachflächen automatisch mit PV-Modulen. Verglichen mit einer rein manuellen Modulbelegung anhand von Satellitenbildern ermöglicht das Tool eine deutlich exaktere Skalierung der Modulabmessungen. Die verwendeten Parameter sind im Anhang A angegeben. In einem zweiten Schritt wurden die Modulbelegungen einzeln manuell kontrolliert und sofern notwendig mit einem Bildbearbeitungsprogramm angepasst. Gründe für Anpassungen waren u.a. unpräzise Dachabmessungen oder unpräzise Nähe zu Hindernissen. Die meisten Anpassungen resultierten

daraus, dass die Dächer so umfassend wie möglich und sinnvoll belegt werden sollten, weshalb an vielen Stellen zusätzliche Module hinzugefügt wurden. Zudem wurden Anordnungen von weniger als drei aneinandergereihten Modulen, sowie fälschlicherweise auf Balkonflächen platzierte Module gestrichen. Schliesslich wurde für jede Dachfläche festgehalten, wie viele Module darauf positioniert werden konnten.

Das Vorgehen wird in Abbildung 1 anhand eines der untersuchten Gebäude illustriert. Es handelt sich dabei um ein nicht-MFH im Quartier Altstetten mit sowohl Schrägdächern (Flächen 1, 3-7) als auch mit einem Flachdach (Fläche 2). Sonnendach.ch unterscheidet sieben Dachflächen, wovon drei (5,6 und 7) aufgrund ihrer zu tiefen Eignung als ökonomisch ungeeignet eingestuft wurden (siehe Kapitel 2.2). Der untere Teil des Gebäudes gehört zu einer anderen EGID, weshalb er nicht untersucht wurde. Auf den Flächen 1-4 lassen sich jeweils 0, 11, 48 bzw. 75 Module positionieren. Auf den Flächen 5-7 sind es jeweils 109, 22 bzw. 0 Module.

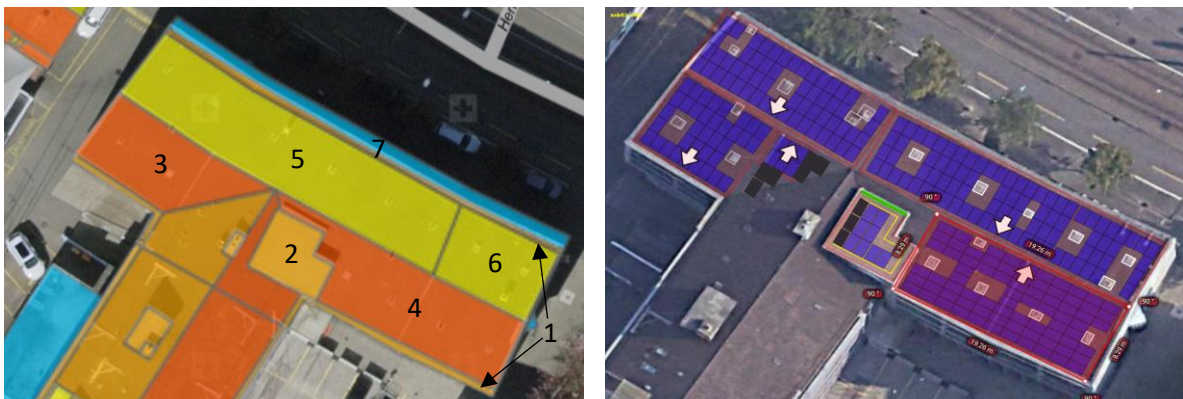


Abbildung 1: Beispiel der Modulbelegung und der Modulzuweisung zu den Dachflächen. Auf der linken Seite sind die verschiedenen Dachflächen von Sonnendach.ch dargestellt. Die unterschiedlichen Farben widerspiegeln die Eignungsklasse der Fläche. Rechts ist die Modulbelegung abgebildet. Die blauen Module wurden mit dem K2-Tool belegt und die schwarzen Module wurden nachträglich von Hand hinzugefügt, um eine möglichst hohe Belegung zu erreichen. Die roten Polygone stellen die im Tool markierten Dachflächen dar, während die hellgrauen Polygone die Hindernisse darstellen. Bei Flachdächern (hier Fläche 2) werden die Module mit einem Abstand zum Dachrand innerhalb des gelben Polygons positioniert.

Weitere Beispiele von Dachflächenbelegungen finden sich im Anhang. Alle finalen Dachbelegungen, sowie der Datensatz der Stichprobe können bei der Projektbeschreibung auf der [Webseite](#) der Forschungsgruppe Erneuerbare Energien bezogen werden.

## 2.4 Bestimmung der Reduktionsfaktoren

Die Reduktionsfaktoren widerspiegeln den Anteil der mit PV belegbaren Dachfläche an der gesamten Dachfläche. Sie ergeben sich aus der konkreten Belegung der Flächen in der Stichprobe. Als erste Abschätzung wurde der Reduktionsfaktor über die Gesamtheit aller untersuchten Dachflächen ermittelt. Dazu wurde gemäss Formel (1) die gesamte für PV verfügbare Fläche durch die Summe aller Dachflächen geteilt. Die für PV verfügbare Dachfläche ergibt sich aus der Gesamtanzahl an PV-Modulen multipliziert mit der Modulfläche von  $1.627 \text{ m}^2$ . Die gesamte Anzahl aller Dachflächen in der Stichprobe ist durch  $n$  gegeben.

$$\text{Reduktionsfaktor (RF)} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Modulanzahl}_i \times 1.627 \text{ m}^2}{\sum_{i=1}^n \text{Dachfläche}_i} \quad (1)$$

Durch diese Berechnungsmethode wird der Reduktionsfaktor jeder untersuchten Dachfläche proportional zu ihrer Fläche gewichtet. Alternativ liesse sich der Reduktionsfaktor als durchschnittlicher Reduktionsfaktor aller Dachflächen berechnen. Um eine möglichst präzise Gesamtfläche in der Schweiz zu erhalten, ist dies jedoch nicht zielführend, da v.a. der Anteil an der Gesamtfläche relevant ist.

Als zweite Abschätzung wurde dasselbe Vorgehen mit allen ökonomisch geeigneten Dachflächen der Stichprobe wiederholt (mittlere Einstrahlung > 1000 kWh/ m<sup>2</sup>/ Jahr, sowie Dachfläche > 10 m<sup>2</sup>, siehe Kapitel 2.2).

Um zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Arten von Dächern allenfalls unterschiedlich dichte Modulbelegungen zulassen, wurden in einer dritten Abschätzung vier Dachkategorien unterschieden. Dies wurde sowohl für die gesamte Stichprobe als auch nur für die ökonomisch geeigneten Dachflächen in der Stichprobe durchgeführt. Es wurde untersucht, inwiefern sich die Reduktionsfaktoren zwischen Flach- (Neigung ≤ 10°) und Schrägdächern (Neigung > 10°) unterscheiden. Zudem wurde vermutet, dass der hohe Anteil an Terrassen- sowie Balkonflächen auf Mehrfamilienhäusern (MFH) eine deutlich weniger dichte PV-Belegung ermöglichen als auf anderen Dächern. Daher wurde zusätzlich zwischen MFH (GKAT = 1025) und anderen Gebäuden (nicht-MFH) unterschieden. Unter nicht-MFH fallen sowohl Einfamilienhäuser (GKAT = 1021) als auch Wohngebäude mit (GKAT = 1030) und ohne Wohnnebennutzung (GKAT = 1010, 1040, 1060 oder 1080). Bei Gebäuden, denen im GWR kein EGID zugewiesen wird, handelt es sich um Gebäude ohne Wohnnebennutzung und somit um nicht-MFH. Dies ist bei ca. 0.2 % der Dachflächen der Fall. Bei 0.8 % dieser Dachflächen entstand der Widerspruch, dass ihnen im Sonnendach.ch-Datensatz dennoch eine EGID zugewiesen wird. Dies ist jedoch aufgrund des kleinen Anteils (0.2 % x 0.8 % = 0.0016%) am gesamten Datensatz vernachlässigbar.

Andere Untersuchungen machten eine zusätzliche Unterscheidung anhand der Fläche der Dächer, wobei für sehr grosse Flachdächer (> 1000 m<sup>2</sup>) leicht höhere Reduktionsfaktoren geschätzt wurden (Portmann et al., 2019). In diesem Bericht wurde davon abgesehen, da sich in der Stichprobe lediglich eine Dachfläche befand, welche grösser als 1000 m<sup>2</sup> ist. Das zuvor beschriebene Vorgehen wurde jeweils über die Gesamtheit aller Dachflächen jeder Kategorie wiederholt, um anhand von Formel (1) für jede Dachkategorie einen eigenen Reduktionsfaktor zu bestimmen.

## 2.5 Potenzialberechnung

Sonnendach.ch gibt für jede Dachfläche einen theoretisch erreichbaren Stromertrag an. Dieser nimmt eine vollständige Belegung des Daches mit PV-Modulen an und basiert auf den Überlegungen in Formel (2). Angenommen wird ein Modulwirkungsgrad (MW) von 17 % und eine Performance Ratio (PR) von 80 % (Klauser & Schlegel, 2016). Die gesamte jährliche Einstrahlung des Sonnendach.ch-Datensatzes bildet den Mittelwert der Jahre 2004-2014 ab und berücksichtigt eventuelle Verschattungen (Klauser & Schlegel, 2016). Da der durchschnittliche Modulwirkungsgrad der zukünftig hinzugefügten PV-Anlagen einer gewissen Unsicherheit unterliegt, wurde das Potenzial zusätzlich auch für einen Modulwirkungsgrad von 20 % geschätzt. Gegenüber der Schätzung mit einem Modulwirkungsgrad von 17 % vergrössert sich das Potenzial dadurch um den Faktor 0.2/0.17 = 1.1765.

$$\text{Stromertrag} = \text{Gesamteinstrahlung} \times \text{Dachfläche} \times MW \times PR \quad (2)$$

Da meist nicht die gesamte Dachfläche mit Modulen belegt werden kann, ergibt sich der tatsächliche Stromertrag einer Dachfläche über die Multiplikation des theoretischen Stromertrages mit dem Reduktionsfaktor. Um das Potenzial in der Schweiz abzuschätzen, wird der tatsächliche Stromertrag schliesslich über alle betrachteten Dachflächen der Schweiz summiert (siehe Formel (3)).

$$\text{Gesamtpotenzial} = \sum \text{Stromertrag} \times RF \quad (3)$$

Bei der Unterscheidung von Dachkategorien wird analog vorgegangen und jeweils der Reduktionsfaktor der entsprechenden Dachkategorie verwendet.



### 3 Resultate

#### 3.1 Ausnutzungsgrad der Dachflächen in der Stichprobe

In Abbildung 2 ist für alle Dachflächen der Ausnutzungsgrad, also der Anteil der mit PV belegbaren Dachfläche an der gesamten Dachfläche, dargestellt. Die konkreten Modulbelegungen aller Dachflächen, sowie weitere Informationen zu allen Dachflächen können auf der Webseite der Forschungsgruppe Erneuerbare Energien bezogen werden. Ein Grossteil der untersuchten Dachflächen (457, resp. 66 %) wurde aufgrund ihrer Fläche oder Eignungskategorie als ökonomisch ungeeignet erachtet. Auf 424 dieser Dachflächen konnten ohnehin keine PV-Module platziert werden, weshalb sich ein Ausnutzungsgrad von null ergab. Dies kommt dadurch zu Stande, dass viele dieser Dachflächen sehr klein sind. So sind 255 dieser Dachflächen kleiner als 5 m<sup>2</sup> und 165 davon sogar kleiner als 2 m<sup>2</sup>. Vor allem bei den sehr kleinen Dachflächen handelt es sich oftmals um Objekte wie z.B. Schornsteine, welche von Sonnendach.ch als eigene Dachfläche eingestuft werden. Die meisten ökonomisch geeigneten Dachflächen in der Stichprobe könnten mit PV-Modulen belegt werden.

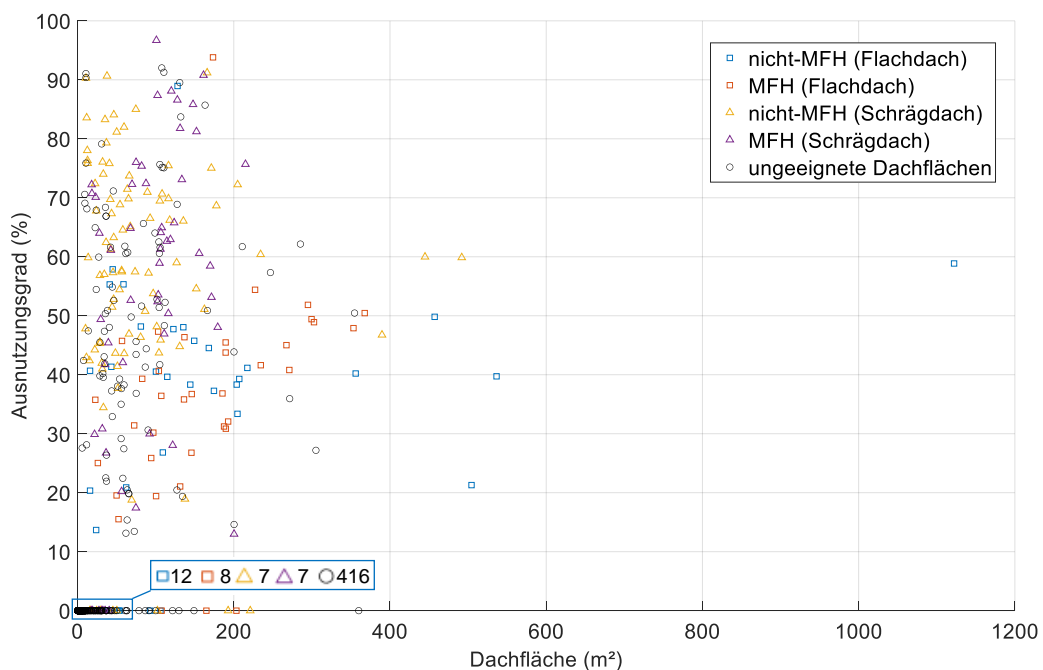


Abbildung 2: Streudiagramm der Ausnutzungsgrade aller Dachflächen in der Stichprobe. Die aufgrund ihrer Fläche oder Eignungskategorie ökonomisch ungeeigneten Dachflächen werden als schwarzer Kreis dargestellt. In der unteren linken Ecke des Diagramms überlappen sehr viele Dachflächen, weshalb im blauen Rechteck nebenan die Gesamtanzahl gegeben ist.

Die Spannweite des Ausnutzungsgrades ist v.a. bei kleinen Dachflächen riesig und reicht von 0 bis zu beinahe 100 %. Bei grösseren Dachflächen, ab ca. 250 m<sup>2</sup>, reduziert sich diese Spannweite und die Ausnutzungsgrade in der Stichprobe betragen, mit einer Ausnahme, zwischen 20 und 60 %. Die Dächer in der Stichprobe bei welchen sich über 50 % der Gesamtfläche mit PV-Modulen belegen liessen, sind grösstenteils Schrägdächer. Bei den Flachdächern liessen sich meistens lediglich 30 – 50 % der Gesamtfläche nutzen. Zwischen den urbanen und den suburbanen Gebäuden wurde kein relevanter Unterschied festgestellt.

### 3.2 Reduktionsfaktoren und Solarstrompotenzial auf Dächern

Die ermittelten Reduktionsfaktoren, die entsprechenden für PV-Module verfügbaren Flächen und das Solarstrompotenzial sind in Tabelle 1 aufgelistet. Betrachtet man alle Dachflächen der Schweiz, so betragen die Reduktionsfaktoren zwischen 43.8 und 45.7 %. Werden nur die ökonomisch geeigneten Dachflächen in die Analyse miteinbezogen, so können davon 47.7 bis 50.0 % mit PV-Modulen belegt werden. Hochgerechnet auf alle Dachflächen im Sonnendach.ch-Datensatz ergibt dies eine PV-Fläche zwischen 220 und 294 km<sup>2</sup> und ein Potenzial zwischen 43.0 und 52.7 TWh pro Jahr.

Tabelle 1: Die schweizweiten Reduktionsfaktoren, sowie die daraus resultierende PV-Fläche und das entsprechende Potenzial bei einem Modulwirkungsgrad von 17 bzw. 20 %. Die Reduktionsfaktoren beziehen sich auf die Summe aller Dachflächen der Schweiz bzw. auf sie Summe aller ökonomisch geeigneten Dachflächen der Schweiz.

|  | Reduktionsfaktor (%) | PV-Fläche (km <sup>2</sup> ) | Potenzial (TWh/a) |
|--|----------------------|------------------------------|-------------------|
| Ohne Unterscheidung von Dachkategorien     |                      |                              |                   |
| • Alle Dachflächen                         | 43.8                 | 282                          | 43.0 – 50.6       |
| • Ökonomisch geeignete Dachflächen         | 47.7                 | 220                          | 36.9 - 43.4       |
| Mit der Unterscheidung von Dachkategorien* |                      |                              |                   |
| • Alle Dachflächen                         | 45.7                 | 294                          | 44.8 – 52.7       |
| • Ökonomisch geeignete Dachflächen         | 50.0                 | 231                          | 38.8 – 45.6       |

\*Für Flach- und Schrägdächer wurden unterschiedliche Reduktionsfaktoren ermittelt. Der hier angegebene totale Reduktionsfaktor berücksichtigt, dass Flach- und Schrägdächer in der Schweiz anteilmässig anders vertreten sind als in der Stichprobe.

Die detaillierten Resultate bei der Unterscheidung zwischen Flach- und Schrägdächern und zwischen MFH und nicht-MFH sind in Tabelle 2 aufgelistet. Ebenfalls aufgezeigt ist die Aufteilung der 690 untersuchten Dachflächen, bzw. der 233 ökonomisch geeigneten Dachflächen auf die verschiedenen Kategorien.

Tabelle 2: Verteilung der Stichprobe auf die untersuchten Dachkategorien, sowie die ermittelten Reduktionsfaktoren und der daraus resultierenden schweizweiten Potenziale für alle Kategorien. Aufgrund der kleinen Unterschiede zwischen den Reduktionsfaktoren für MFH und nicht-MFH wurden diese Reduktionsfaktoren jeweils gemittelt. Das schweizweite Potenzial wurde anschliessend mit den gemittelten Reduktionsfaktoren berechnet.

|                                  |                                   | Flachdach (nicht-MFH) | Flachdach (MFH) | Schrägdach (nicht-MFH) | Schrägdach (MFH) |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------|------------------|
| Alle Dachflächen                 | Gebäude (Anzahl)                  | 41                    | 40              | 37                     | 32               |
|                                  | Dachflächen (Anzahl)              | 113                   | 120             | 322                    | 135              |
|                                  | Reduktionsfaktor (%)              | 32                    | 36              | 48                     | 55               |
|                                  | Gemittelte Reduktionsfaktoren (%) | 34                    |                 | 52                     |                  |
|                                  | Potenzial bei MW 17 % (TWh/a)     | 8.4                   | 1.8             | 27.3                   | 7.2              |
|                                  | Anteil am Gesamtpotenzial (%)     | 19                    | 4               | 61                     | 16               |
| Ökonomisch geeignete Dachflächen | Gebäude (Anzahl)                  | 24                    | 23              | 37                     | 29               |
|                                  | Dachflächen (Anzahl)              | 42                    | 45              | 91                     | 55               |
|                                  | Reduktionsfaktoren (%)            | 40                    | 39              | 54                     | 59               |
|                                  | Gemittelte Reduktionsfaktoren (%) | 39                    |                 | 56                     |                  |
|                                  | Potenzial bei MW 17 % (TWh/a)     | 8.7                   | 1.9             | 22.3                   | 5.9              |
|                                  | Anteil am Gesamtpotenzial (%)     | 22                    | 5               | 57                     | 16               |

Auf Flachdächern liessen sich bei Mehrfamilienhäusern 36 % und bei den restlichen Gebäuden 32 % der Gesamtfläche mit PV-Modulen belegen. Somit wurde zwischen diesen beiden Kategorien kaum ein Unterschied festgestellt. Auch bei Schrägdächern konnte lediglich ein Unterschied von 7 % zwischen nicht-MFH und MFH festgestellt werden. Werden die ökonomisch ungeeigneten Flächen von der Analyse ausgeschlossen so zeigt sich ein ähnliches Bild. Die ermittelten Reduktionsfaktoren sind im Vergleich leicht höher und die Unterschiede zwischen den Dächern auf MFH und nicht-MFH sind noch kleiner. Aufgrund der kleinen Unterschiede wurde bei der Potenzialabschätzung in beiden Fällen nicht zwischen MFH und nicht-MFH unterschieden.

Somit empfehlen wir bei der Betrachtung *aller Dachflächen* einen Reduktionsfaktor von **34 % für Flachdächer** und einen Reduktionsfaktor von **52 % für Schrägdächer** anzuwenden. Bei Berücksichtigung des jeweiligen schweizweiten Anteils von Flach- und Schrägdächern in Sonnendach.ch ergibt sich ein Reduktionsfaktor von 45.7 % bezogen auf alle Dachflächen der Schweiz (siehe Tabelle 1).

Bei der Betrachtung von ausschliesslich *ökonomisch geeignete Dachflächen* empfehlen wir Reduktionsfaktoren von **39 % für Flachdächer** und **56 % für Schrägdächer** anzuwenden. Bezogen auf alle ökonomisch geeigneten Dachflächen der Schweiz ergibt dies einen Reduktionsfaktor von 50 % (siehe Tabelle 1). Bei einem Modulwirkungsgrad von 17 % entspricht dies einem **Solarstrompotenzial von 38.8 TWh pro Jahr** auf ökonomisch geeigneten Dachflächen. Wird ein Modulwirkungsgrad von 20 % anstelle der 17 % von Sonnendach.ch verwendet, so erhöht sich das Gesamtpotenzial auf 45.6 TWh pro Jahr.

Der grösste Anteil des schweizweiten Potenzials befindet sich auf Schrägdächern von nicht-MFH. Dies entspricht 57 % des ermittelten Potenzials auf ökonomisch geeignete Dachflächen. Das Potenzial auf allen Schrägdächern entspricht 73 % des Gesamtpotenzials. Bei Flachdächern sind mit einem Gesamtanteil von 22 % vor allem die nicht-MFH relevant, während Flachdächer auf MFH lediglich einen Beitrag von 5 % zum Gesamtpotenzial leisten (siehe Tabelle 2).

## 4 Diskussion

In anderen Studien wurden ökonomisch ungeeignete Dachflächen meist von der Analyse ausgeschlossen (Assouline et al., 2018; Portmann et al., 2019; Remund et al., 2019; Walch et al., 2020). Da die meisten ökonomisch ungeeigneten Dachflächen in unserer Stichprobe sich ohnehin nicht mit PV-Modulen belegen liessen, erscheint dies sinnvoll. Daher vergleichen wir die Schätzungen von anderen Studien nachfolgend mit unserer eigenen Schätzung, welche ebenfalls nur ökonomisch geeignete Dachflächen in Betracht zieht.

Der Fokus des Vergleichs liegt ausserdem auf der Schätzung, welche auf der Unterscheidung von Flach- und Schrägdächern basiert. Die beiden Dachkategorien sind in der Stichprobe anteilmässig anders vertreten als im Schweizer Durchschnitt. Dementsprechend gehen wir davon aus, dass diese Unterscheidung zu einer für die Schweiz zutreffenderen Schätzung des Reduktionsfaktors und des Potenzials führt. So lässt sich das leicht höhere Potenzial bei der Unterscheidung von Flach- und Schrägdächern wahrscheinlich dadurch begründen, dass in unserer Stichprobe anteilmässig mehr Flachdächer vorhanden waren als über die gesamte Schweiz betrachtet.

Zwischen den urbanen und den suburbanen Gebäuden wurde bezüglich der Reduktionsfaktoren kein relevanter Unterschied festgestellt. Daher scheint die Verteilung der Stichprobe auf die beiden Quartiere nur einen geringen Einfluss auf die ermittelten Reduktionsfaktoren zu haben. Es sollte jedoch idealerweise trotzdem noch überprüft werden, ob es Unterschiede zwischen den Gebäuden in verschiedenen Kantonen oder Regionen gibt. Im Optimalfall sollten zufällig gewählte Gebäude aus der gesamten Schweiz untersucht werden.

### 4.1 Reduktionsfaktoren

#### 4.1.1 Vergleich der Reduktionsfaktoren und der verfügbaren Dachfläche mit anderen Studien

Mit 50.0 % ist der von uns bestimmte Reduktionsfaktor bezogen auf die ökonomisch geeigneten Dachflächen tiefer als die Schätzungen von Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018), welche 56.4 bzw. 60.5 % betragen. Ein noch grösserer Unterschied besteht jedoch zur Schätzung von Portmann et al. (2019) von 69.1 %. Dieser Wert wurde im ursprünglichen Bericht nicht angegeben, weshalb wir ihn selbst berechneten. Dazu wurde jeder Dachfläche im Sonnendach.ch-Datensatz gemäss der Dokumentation von Portmann et al. (2019) der entsprechende Reduktionsfaktor zugewiesen. Den schweizweiten Reduktionsfaktor von 69.1 % berechneten wir daraus anschliessend als flächengewichteten Mittelwert aller ökonomisch geeigneten Dachflächen.

Da die Reduktionsfaktoren jeweils dem nutzbaren Anteil aller ökonomisch geeigneten Dachflächen entsprechen, sind sie von der Definition der «ökonomischen Eignung» abhängig. Diese variiert je nach Studie, siehe auch Kapitel 4.2.2. Die gesamte für PV-Anlagen verfügbare Dachfläche in der Schweiz ist hingegen unabhängig davon und bietet einen verlässlicheren Vergleich zwischen verschiedenen Abschätzungen. Wir schätzen die gesamte nutzbare Dachfläche mit 231 km<sup>2</sup> am tiefsten ein. Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) schätzen jeweils 267 bzw. 252 km<sup>2</sup>. Die Schätzung von Portmann et al. (2019) wurde nicht dokumentiert, jedoch beträgt sie gemäss unseren Berechnungen 319 km<sup>2</sup>. Dazu wiesen wir jeder ökonomisch geeigneten Dachfläche den Reduktionsfaktor gemäss der Dokumentation von Portmann et al. (2019) zu und summierten die resultierende Fläche anschliessend über die gesamte Schweiz auf.

Während die Studien von Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) durch maschinelles Lernen die Reduktionsfaktoren aller Dachflächen individuell bestimmten, schätzten Portmann et al. (2019) Reduktionsfaktoren für unterschiedliche Dachkategorien ab. Die Reduktionsfaktoren sind in Tabelle 3 aufgeführt. Sie wurden anhand von Befragungen bei Solar-Unternehmen und Swissolar ermittelt (Portmann et al., 2019).

Tabelle 3: Die von Portmann et al. (2019) verwendeten Reduktionsfaktoren für verschiedene Dachkategorien.

|  | Flachdach (Neigung $\leq 10^\circ$ ) |                                    |                                       | Schrägdach (Neigung $> 10^\circ$ ) |                                    |                                       |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
|  | Dachfläche < 200 m <sup>2</sup>      | Dachfläche 300-1000 m <sup>2</sup> | Dachfläche $\geq 1000$ m <sup>2</sup> | Dachfläche < 200 m <sup>2</sup>    | Dachfläche 300-1000 m <sup>2</sup> | Dachfläche $\geq 1000$ m <sup>2</sup> |
| EFH (GKAT = 1021)  | 0.7                                  | 0.7                                | -                                     | 0.7                                | 0.7                                | 0.7                                   |
| MFH (GKAT = 1025)  | 0.6 x 0.7                            | 0.6 x 0.7                          | 0.6 x 0.8                             | 0.7                                | 0.7                                | 0.7                                   |
| Gebäude mit Wohn-Nebennutzung (GKAT = 1030)                    | 0.7                                  | 0.7                                | 0.8                                   | 0.7                                | 0.7                                | 0.7                                   |
| Gebäude ohne Wohn-Nebennutzung (GKAT = 1010, 1040, 1060, 1080) | 0.7                                  | 0.7                                | 0.8                                   | 0.7                                | 0.7                                | 0.7                                   |

Ein Vergleich der von uns ermittelten Reduktionsfaktoren mit den Faktoren von Portmann et al. (2019) ist in Abbildung 3 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Reduktionsfaktoren von Portmann et al. (2019) auf unsere Stichprobe umgerechnet. Dazu wurde jeder Dachfläche in der Stichprobe ein Reduktionsfaktor gemäss Tabelle 3 zugewiesen und anschliessend der flächengewichtete Mittelwert über die unterschiedlichen Dachkategorien berechnet. Da sich in unserer Stichprobe ein Flachdach auf einem nicht-MFH mit einer Fläche grösser 1000 m<sup>2</sup> befindet ist der umgerechnete Reduktionsfaktor leicht höher als 70 %. Die restlichen Kategorien werden durch diese Umrechnungen jedoch nicht beeinflusst und können direkt aus Tabelle 3 übernommen werden.

Die von uns ermittelten Reduktionsfaktoren sind über alle Kategorien hinweg tiefer als die Abschätzung von Portmann et al. (2019). Während wir bei Flachdächern keine Unterschiede zwischen MFH und nicht-MFH feststellen konnten, werden diese Kategorien von Portmann et al. (2019) deutlich unterschieden. Für die Flachdächer auf nicht-MFH berechnen wir einen um 32 Prozentpunkte tieferen Reduktionsfaktor. Bei Schrägdächern stützten unsere Erkenntnisse die Annahme von Portmann et al. (2019), dass unterschiedliche Gebäudetypen im Schnitt ungefähr dieselben Reduktionsfaktoren aufweisen. Jedoch berechneten wir über beide Kategorien hinweg einen um 14 Prozentpunkte tieferen Reduktionsfaktor von 56 %.

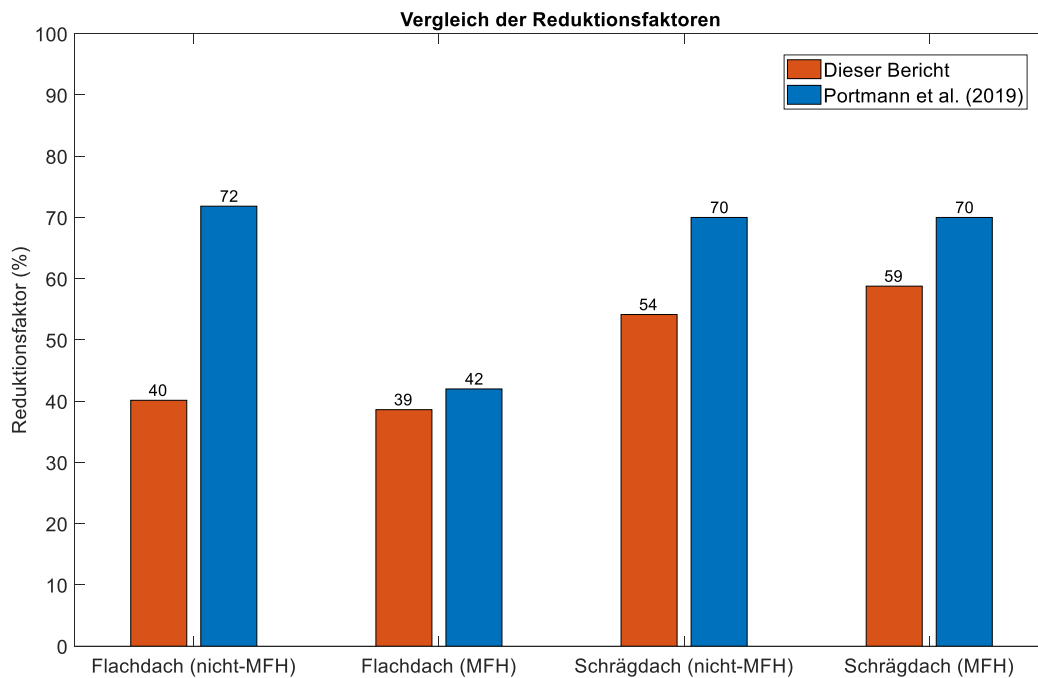


Abbildung 3: Reduktionsfaktoren der ökonomisch geeigneten Dachflächen gemäss unserer Studie (rot) im Vergleich mit den Werten von Portmann et al. (2019).

#### 4.1.2 Abhängigkeit der Reduktionsfaktoren von der Stichprobengrösse

In Abbildung 4 ist die Abhängigkeit des berechneten Reduktionsfaktors von der Stichprobengrösse dargestellt. Es handelt sich dabei um den Reduktionsfaktor bezogen auf alle ökonomisch geeigneten Dachflächen in der Stichprobe. Bei einer kleinen Anzahl untersuchter Dachflächen können erwartungsgemäss starke Schwankungen des berechneten Reduktionsfaktors festgestellt werden. Ab ca. 80 Dachflächen ist eine Stabilisierung zu beobachten. Diese kommt einerseits dadurch zu Stande, dass hinzukommende Dachflächen bei einer hohen Anzahl zunehmend weniger am bestehenden Reduktionsfaktor ausmachen. Andererseits scheint ein Reduktionsfaktor, welcher anhand von 80 Dachflächen bestimmt wurde, den tatsächlichen Reduktionsfaktor bereits gut abzubilden. So änderte sich der Reduktionsfaktor mit dem Hinzukommen der restlichen 153 Dachflächen je nach Reihenfolge innerhalb der Stichprobe maximal um ca. 1 - 4 %. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die Untersuchung weiterer Dachflächen den Reduktionsfaktor nicht mehr entscheidend ändern würde.

In Abbildung 5 ist die Abhängigkeit der berechneten Reduktionsfaktoren von der Stichprobengrösse für Flach- und Schrägdächern dargestellt. Es handelt sich dabei um dieselben zufälligen Anordnungen wie in Abbildung 4. Die Stichprobe der Schrägdächer ist mit 146 Dachflächen deutlich grösser als die der Flachdächer (87 Dachflächen). Die insgesamt untersuchte Dachfläche ist jedoch beinahe identisch. So wurden 12'283 m<sup>2</sup> Schräg- und 12'278 m<sup>2</sup> Flachdächer untersucht. Auch hier ändern sich die berechneten Reduktionsfaktoren bei einer hohen Anzahl Dachflächen kaum mehr. Die Reduktionsfaktoren scheinen demzufolge die Mittelwerte in den untersuchten Quartieren gut abzubilden. Da sich die Reduktionsfaktoren nach etwa 80 untersuchten Dachflächen einpendelten und weitere ca. 40 Dachflächen nötig sind, um ein mögliches Abdriften zu erkennen, scheint für zukünftige Abschätzungen ein Richtwert von mindestens 120 untersuchten Dachflächen sinnvoll.

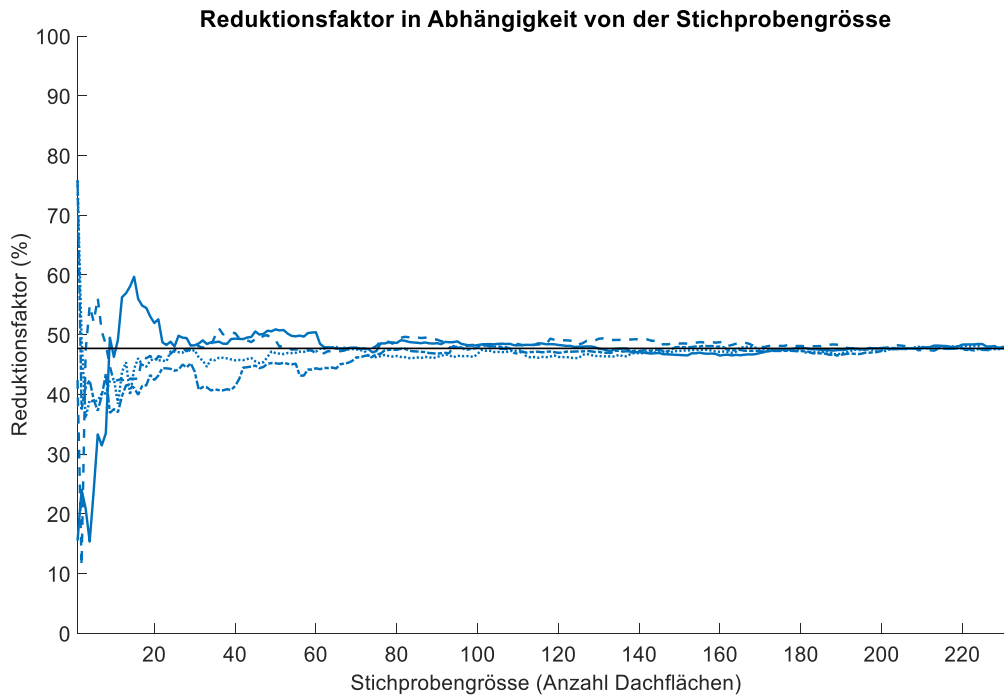


Abbildung 4: Flächengewichteter mittlerer Reduktionsfaktor der ökonomisch geeigneten Dachflächen in Abhängigkeit von der Anzahl untersuchter Dachflächen. Da der Verlauf abhängig von der Anordnung der Dachflächen innerhalb der Stichprobe ist, sind vier verschiedene zufällige Anordnungen dargestellt. Die schwarze Linie entspricht dem über die gesamte Stichprobe berechneten Reduktionsfaktor von 47.7 %.

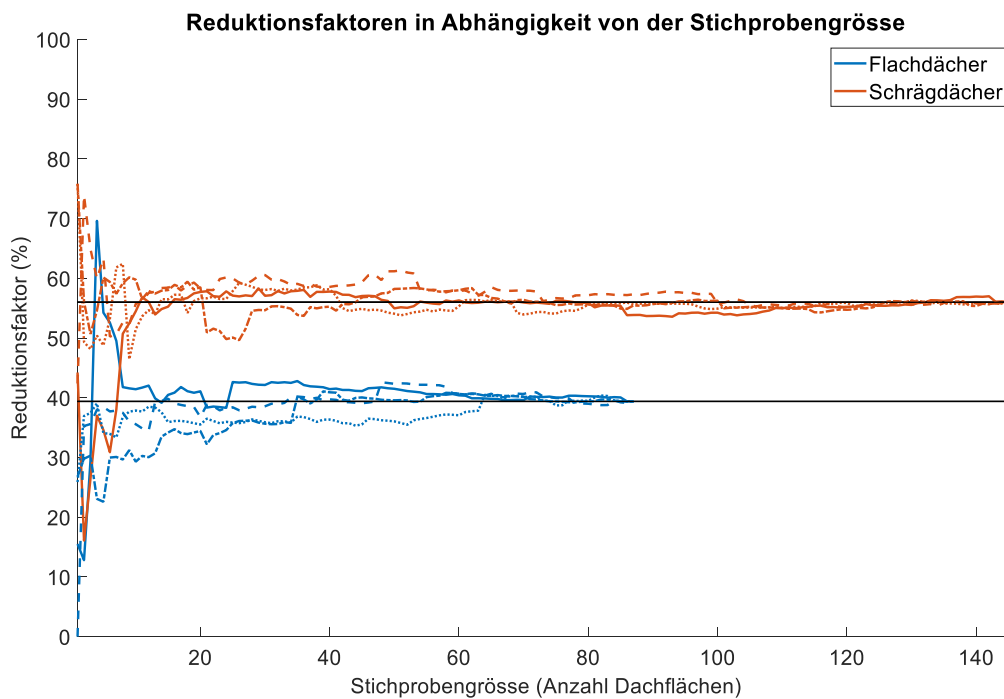


Abbildung 5: Flächengewichteter mittlerer Reduktionsfaktor jeweils für Flach- und Schrägdächer in Abhängigkeit von der Anzahl untersuchter Dachflächen. Da der Verlauf abhängig von der Anordnung der Dachflächen innerhalb der Stichprobe ist, sind sowohl für Flach- als auch für Schrägdächer jeweils vier verschiedene zufällige Anordnungen dargestellt.

## 4.2 Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern

### 4.2.1 Einfluss des Modulwirkungsgrads

Der gewählte Modulwirkungsgrad hat einen linearen Einfluss auf die Potenzialschätzung. Für das Potenzial ist dabei der durchschnittliche Modulwirkungsgrad aller am Schluss installierten PV-Anlagen entscheidend. Da PV-Module eine Lebensdauer von mindestens 25 Jahren haben, werden die PV-Module, welche heute installiert werden, bis 2050 mehrheitlich noch nicht durch neuere Module ersetzt worden sein. Sonnendach.ch verwendet einen Modulwirkungsgrad von 17 %, was mittlerweile ungefähr dem durchschnittlichen Wirkungsgrad von neu installierten PV-Modulen entspricht (Burger et al., 2020). Die meisten anderen Potenzialabschätzungen nehmen ebenfalls einen Modulwirkungsgrad von 17 % an (Assouline et al., 2018; Portmann et al., 2019; Remund et al., 2019; Walch et al., 2020). Der Wirkungsgrad kommerzieller Module wird sich jedoch weiterhin verbessern. Dementsprechend müssten die Potenzialschätzungen nach oben korrigiert werden. Wird z.B. davon ausgegangen, dass die installierten Module im Durchschnitt einen Modulwirkungsgrad von 20 anstelle von 17 % haben, so erhöht sich unsere Potenzialschätzung auf 45.6 TWh/a. Wird die ungefähr lineare Zunahme des Modulwirkungsgrades zwischen 2006 und 2018 (Burger et al., 2020) in naher Zukunft weitergeführt, so scheint bei neuen Modulen ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 20 % im Jahr 2028 erreichbar. Je nachdem wie schnell der Ausbau von PV-Anlagen auf Dächern voranschreitet, scheint somit ein durchschnittlicher Modulwirkungsgrad aller installierten Module von 17 bis 20 % gerechtfertigt.

### 4.2.2 Einfluss der Definition der ökonomisch geeigneten Dachflächen

Die Definition der ökonomisch geeigneten Dachflächen ist ein weiterer Aspekt, welcher einen Einfluss auf unsere Schätzung hat. Wir definieren ökonomisch geeignete Dachflächen gleich wie Portmann et al. (2019) bzw. Sonnendach.ch durch eine Mindest-Dachfläche von 10 m<sup>2</sup> und eine mittlere jährliche Einstrahlung von mindestens 1000 kWh/m<sup>2</sup>. Unökonomische Dachflächen können jedoch auch durch andere Kriterien herausgefiltert werden. So definieren Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) alle Dachflächen < 8 m<sup>2</sup> oder mit einer nördlichen Ausrichtung ( > 90° Abweichung von Süden) als ökonomisch ungeeignet. Die tiefere Mindest-Dachfläche erscheint durchaus sinnvoll, da auf einer Fläche von 8 m<sup>2</sup> im besten Fall immer noch 4 Standard-PV-Module Platz finden.

In unserer Analyse führt die Reduktion der Mindest-Dachfläche von 10 auf 8 m<sup>2</sup> jedoch auf beinahe dieselben Resultate. Die verfügbare Fläche sowie das geschätzte Potenzial ändern sich dadurch lediglich um 0.1 %.

Eine deutlich höhere Abweichung erhalten wir, wenn wir zusätzlich anstelle der minimalen jährlichen Einstrahlung, alle Dachflächen mit nördlicher Ausrichtung als unökonomisch einstufen. Dieses Kriterium reduzierte die von uns geschätzte Fläche auf 137 km<sup>2</sup> und das Potenzial (bei einem Modulwirkungsgrad von 17 %) auf 24.1 TWh/a. Dies entspricht einer Abnahme der verfügbaren Fläche und des Potenzials um 40.7 %, bzw. um 37.9 %. Dass Dächer, deren Ausrichtung mehr als 90° von Süden abweicht, nicht berücksichtigt werden, erscheint uns jedoch v.a. bei kleinen Neigungswinkeln nicht sinnvoll. So liefert ein PV-Modul auf einem Flachdach mit nördlicher Ausrichtung gleich viel Strom wie ein PV-Modul auf einem Flachdach mit südlicher Ausrichtung. Eine Dokumentation, wie mit dieser Problematik umgegangen wird, konnte weder bei Walch et al. (2020) noch bei Assouline et al. (2018) gefunden werden.



### 4.2.3 Vergleich mit Potenzialabschätzungen anderen Studien und mit der Schätzung des BFE

Die potenzielle Stromerzeugung auf vorhandenen Dachflächen in der Schweiz aus unserer Studie wird in Abbildung 6 mit anderen Potenzialabschätzungen verglichen. Die Abschätzungen unterliegen einer sehr grossen Spannweite und reichen von 16 bis 53 TWh/a (Assouline et al., 2018; Portmann et al., 2019; Remund et al., 2019; Walch et al., 2020). Unsere Schätzung von 38.8 bis 45.6 TWh/a reiht sich dabei im mittleren Bereich der bisher getroffenen Abschätzungen ein. Bemerkenswert ist, dass sich das BFE auf die Studie stützt, welche das Potenzial am höchsten einschätzt (BFE, 2018). Die Schätzung von Swissolar ist mit 49.1 TWh/a zwar ähnlich hoch, jedoch wird das bis 2050 realisierbare Potenzial mit 24 TWh/a deutlich tiefer eingeschätzt (Remund et al., 2019). Die computergestützten Abschätzungen von Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) führten mit 24.6 und 16.3 TWh/a beide auf deutlich tiefere Potenziale.

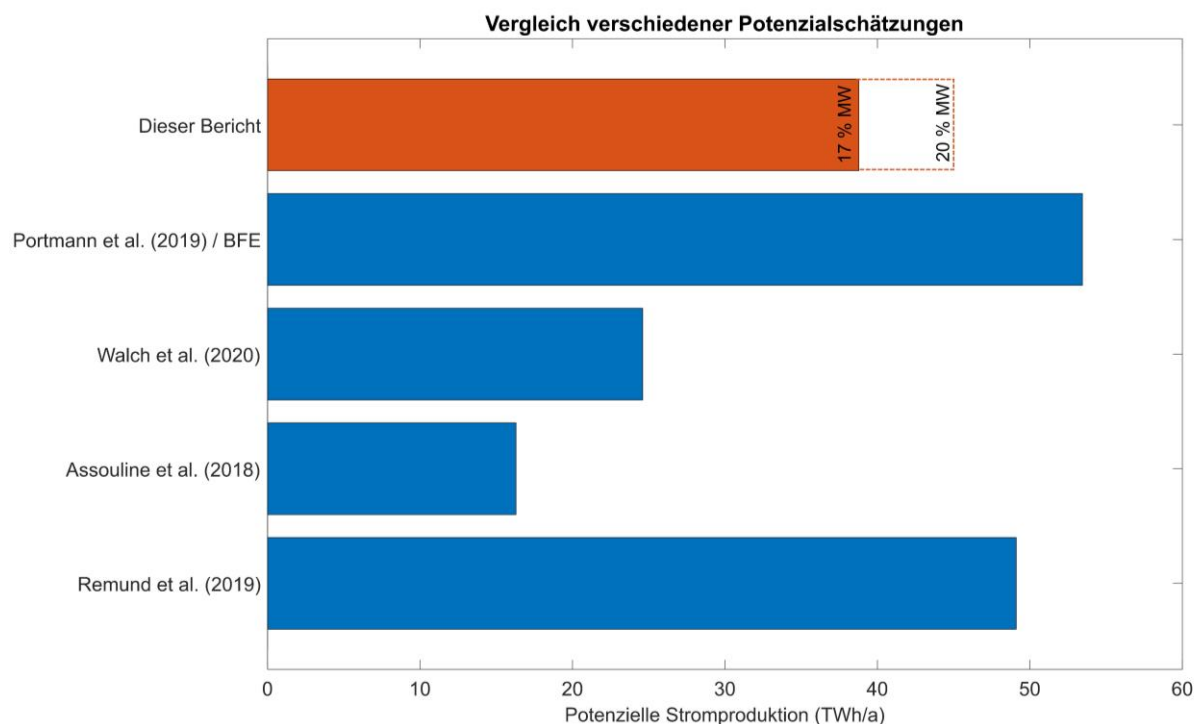


Abbildung 6: Die potenzielle Stromerzeugung auf vorhandenen Dachflächen in der Schweiz im Vergleich mit bestehender Literatur. Das von uns berechnete realisierbare Potenzial wird dabei für zwei unterschiedliche Modulwirkungsgrade (MW) berechnet.

Die in dieser Analyse verwendete Methodik unterscheidet sich bei einem Modulwirkungsgrad von 17 % nur bezüglich den eingesetzten Reduktionsfaktoren von der Methodik in Portmann et al. (2019). Die Studien von Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) unterscheiden sich in vielen weiteren Aspekten von Portmann et al. (2019) und unserer Analyse. Zum Beispiel durch detaillierte Verschattungs- und Einstrahlungsrechnungen, individuelle Berechnung der Reduktionsfaktoren der Dächer mit maschinellem Lernen und Berücksichtigung der temperaturabhängigen Änderung der Moduleffizienz (Assouline et al., 2018; Walch et al., 2020). Somit wäre zu erwarten gewesen, dass unsere Schätzung im Vergleich zu Walch et al. (2020) und Assouline et al. (2018) näher am Resultat von Portmann et al. (2019) liegen würde.

Das BFE stützt sich bei seiner offiziellen Potenzialschätzung auf den Bericht von Portmann et al. (2019) (BFE, 2018). Die verschiedenen Berechnungsschritte sind in Abbildung 7 visualisiert. Das theoretische Potenzial auf allen im Sonnendach.ch-Datensatz vorhandenen Dachflächen beträgt knapp 100 TWh/a. Durch den Ausschluss von ökonomisch ungeeigneten Dachflächen anhand der Eignungskategorie

(mittlere Einstrahlung < 1000 kWh/m<sup>2</sup>/Jahr) und der Dachfläche (< 10 m<sup>2</sup>), verbleibt ein Potenzial von 77 TWh/a. Das berechnete PV-Produktionspotenzial beläuft sich mit den Reduktionsfaktoren unserer Analyse auf 38.8 bis 45.6 TWh/a. Anhand der Reduktionsfaktoren von Portmann et al. (2019), berechnet sich ein höheres Potenzial von 53.4 TWh/a, wobei dieses Resultat vom BFE in einer Pressemitteilung vom 26.09.2018 als «rund 50 TWh pro Jahr» kommuniziert wurde (BFE, 2018). Je nach angenommenem Modulwirkungsgrad ist unser Resultat somit um 11.2 oder 4.4 TWh/a, resp. um 27 % oder 9 % tiefer als die Schätzung des BFE.

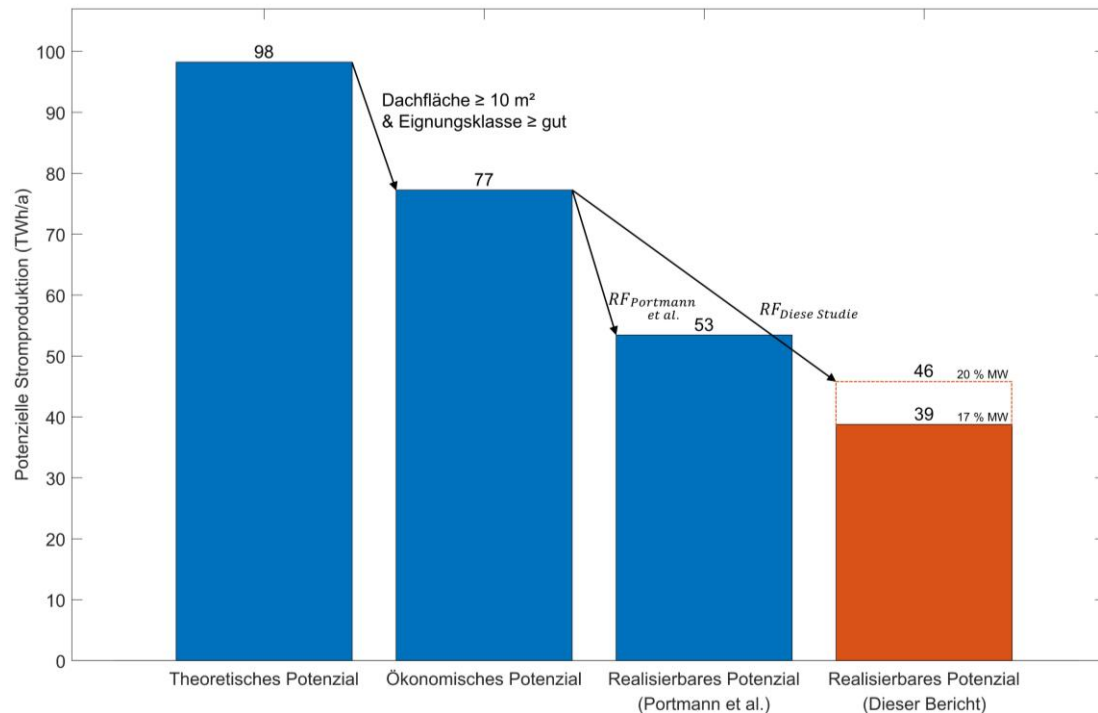


Abbildung 7: Vergleich des abgeschätzten Schweizer Solarstrompotenzial auf Dächern mit der Schätzung von Portmann et al. (2019). Beide Resultate basieren auf dem von Sonnendach.ch berechneten theoretischen Potenzial und berücksichtigen dieselben ökonomischen Grenzen. Durch die angepassten Reduktionsfaktoren verschiebt sich das realisierbare Potenzial nach unten.

Die Unterschiede sind eine direkte Folge der anderen Reduktionsfaktoren und werden pro Gebäudekategorie in Tabelle 3 aufgezeigt. Da Portmann et al. (2019) von einem Modulwirkungsgrad von 17 % ausgeht, vergleichen wir seine Abschätzung mit unserem Resultat bei demselben Modulwirkungsgrad.

Die nicht-MFH machen über 80 % des gesamten theoretischen Potenzials auf den ökonomisch geeigneten Dachflächen aus. Dementsprechend befinden sich die grössten absoluten Unterschiede bei Flach- und Schrägdächern auf nicht-MFH. Sie machen 89 % der totalen Abweichung zu Portmann et al. (2019) aus. Da für Flachdächer auf MFH beinahe derselbe Reduktionsfaktor verwendet wurde, ergibt sich für diese Dachkategorie nur ein minimaler Unterschied. Die relativen Unterschiede sind jeweils proportional zu den Unterschieden der Reduktionsfaktoren.

*Tabelle 4: Vergleich der bestimmten Potenziale für die verschiedenen Dachkategorien. Verglichen wird das Potenzial bei einem durchschnittlichen Modulwirkungsgrad von 17 %. Der Potenzialunterschied wurde sowohl absolut (TWh/a) als auch relativ (%) berechnet.*

| Dachkategorie             | Dieser Bericht<br>MW 17 %<br>(TWh/a) | Portmann et al.<br>(2019)<br>(TWh/a) | Potenzialunterschied<br>(TWh/a) | Potenzialunterschied<br>(%) |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Flachdach<br>(nicht-MFH)  | 8.7                                  | 16.2                                 | <b>7.5</b>                      | <b>46.1</b>                 |
| Flachdach (MFH)           | 1.9                                  | 2.0                                  | <b>0.1</b>                      | <b>6.8</b>                  |
| Schrägdach<br>(nicht-MFH) | 22.3                                 | 27.9                                 | <b>5.6</b>                      | <b>20.0</b>                 |
| Schrägdach (MFH)          | 5.9                                  | 7.4                                  | <b>1.5</b>                      | <b>20.0</b>                 |
| <b>Total</b>              | <b>38.8</b>                          | <b>53.4</b>                          | <b>14.7</b>                     | <b>27.44</b>                |

## 5 Fazit

In dieser Analyse wurde basierend auf den Rohdaten von Sonnendach.ch bei einem durchschnittlichen Modulwirkungsgrad von 17 bzw. 20 % für die ganze Schweiz ein realisierbares PV-Dachflächen-Potenzial von 38.8 bzw. 45.6 TWh/a berechnet. Dabei wurden sowohl technische Rahmenbedingungen (vorhandene Dachflächen, Einstrahlung, Modulwirkungsgrad, etc.) als auch soziale (mindestens drei zusammenhängende Module) und ökonomische Grenzen (minimale Einstrahlung und Dachfläche) berücksichtigt.

Die Kategorisierung in Schräg- und Flachdächer erwies sich als sinnvoll, da sich deren Reduktionsfaktoren deutlich unterscheiden. Eine Unterscheidung der Gebäudearten erwies sich hingegen als nicht notwendig. Bezogen auf alle Dachflächen ermittelten wir für Flachdächer einen Reduktionsfaktor von 34 % und für Schrägdächer einen Reduktionsfaktor von 52 %. Bezogen auf nur ökonomische Dachflächen ergeben sich Reduktionsfaktoren von 39 % für Flachdächer bzw. 56 % für Schrägdächer. Für zukünftige Abschätzungen von Reduktionsfaktoren wird eine minimale Stichprobengrösse von 120 Dachflächen vorgeschlagen.

Selbst bei einer Erhöhung des durchschnittlichen Wirkungsgrades der Module von 17 % auf 20 % ist unsere Potentialschätzung ca. 10 % tiefer als die Angabe des BFE. Auch alle anderen betrachteten Studien schätzen das Potential tiefer ein als das BFE.

Die Frage, inwiefern bzw. zu welchem Prozentsatz das ausgewiesene Potential bei den heutigen politischen Rahmenbedingungen ausgeschöpft werden kann, wurde in dieser Studie nicht untersucht. Die für PV geeigneten Dachflächen eignen sich aber selbstverständlich auch für die Nutzung für Solarthermie. Dies reduziert das «sinnvollerweise» für die Stromerzeugung auf Dächern nutzbare Potenzial bzw. den maximalen Ausschöpfungsgrad des PV-Dachflächenpotentials.

Die gemäss Energieperspektiven 2050+ angestrebte PV-Produktion in den Jahren 2035 und 2050 beträgt 15, respektive 34 TWh/a (BFE, 2020b). Ob ein so grosser Anteil des Solarstrompotenziales auf Dächern bis dann ausgeschöpft werden kann, ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen fragwürdig (Remund et al., 2019; Rohrer, 2020). Der Ausschöpfungsgrad des von uns bestimmten Potentials von 38.8 TWh/a beträgt gegenwärtig ungefähr 6 % (BFE, 2020a). Alternativen wie die Nutzung von Fassaden, von bestehenden Infrastrukturen wie z.B. Parkplätze und Lärmschutzwände, Photovoltaik in den Alpen und Landwirtschaftsflächen kombiniert mit PV-Produktion sollten dementsprechend zukünftig PV-Anlagen auf den Dächern ergänzen.

## 6 Quellenverzeichnis

- Assouline, D., Nahid, M., & 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>
- BFE. (o. J.). *Sonnendach.ch*. <https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/sonnendach/>
- BFE. (2018, September 26). *Sonnendach.ch macht das Solarenergiepotenzial der Schweizer Hausdächer von rund 50 TWh/Jahr sichtbar*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-72298.html>
- BFE. (2020a). *Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2019—Datentabellen*. Bundesamt für Energie.
- BFE. (2020b). *Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht*. Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Statistik. (o. J.). *Gebäude- und Wohnungsregister (GWR)*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/register/gebaeude-wohnungsregister.html>
- Burger, B., Kiefer, K., Kost, C., Nold, S., Philipps, S., Preu, R., Rentsch, J., Schlegl, T., Stryi-Hipp, G., Wirth, H., & Warmuth, W. (2020). *Photovoltaics Report* (S. 28) [Präsentation]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- K2 Systems GmbH. (2020, August). *K2 -BASE Modulbelegungstool* [Onlinetool]. <https://base.k2-systems.com/#/dashboard>
- Klauser, D., & Schlegel, T. (2016). *Sonnendach.ch Dokumentation und Datenmodell (v1.4)*. Bundesamt für Energie (BFE).
- Portmann, M., Galvagno-Erny, D., Lorenz, P., & Schacher, D. (2019). *Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden*. Bundesamt für Energie (BFE).
- Remund, J., Albrecht, S., & Stickelberger, 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](https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/Tagungen/PV-Tagung_2019/Medien/190325Solarpotenzial_CH_JanRemund_lang.pdf)
- Rohrer, J. (2020). *Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz*. ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.
- Sauter, D., Hunziker, M., Poppei, J., Cochand, F., Hubbuch, M., Moro, N., & Rohrer, J. (2020). *SolSeasStore—Saisonale Wärmespeicherung in städtischen Quartieren mit Erdwärmesonden* [Schlussbericht]. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.zhaw.ch/de/lisfm/institute-zentren/iunr/ecological-engineering/erneuerbare-energien/solarenergie/solseasstore/>
- Walch, A., Castelloa, R., Mohajerib, 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>

## 7 Anhang

### 7.1 Anhang A: Parameter für die Dachbelegung mit dem K2-Tool

Für die Dachbelegung mit dem K2-Base-Tool wurden die nachfolgend aufgelisteten Parameter verwendet. Die ausgegrauten Werte, verändern die Belegung nicht, jedoch müssen sie dennoch im Tool angegeben werden. Durch die Verwendung des D-Dome 10° Montagesystems auf Flachdächern reduziert sich die Fläche, welches ein Modul auf dem Dach in Anspruch nimmt leicht. Der Einfluss ist mit einem Faktor  $\cos(10^\circ) = 0.985$  jedoch vernachlässigbar.

#### **Unabhängig von der Dachneigung:**

Module: AX270M von Axitec Energy GmbH & Co. KG (1640 x 992 mm)

Horizontale/Vertikale Trennung: Standardeinstellungen vom Tool übernommen.

Gebäudehöhe: 10m

Attikahöhe: 0m

Reibungskoeffizient: 1

#### **Flachdach:**

Montagesystem D-Dome 10°

Dacheindeckung: Folie, Kies

Modulklemme: XS MC / Standard EC

#### **Schrägdach:**

Wenn möglich vertikale Ausrichtung der Module

single rail

Dacheindeckung: Ziegel

Sparrenabstand: 0,7 m

Lattenabstand: 340 mm

## 7.2 Anhang B: Beispiele von Dachbelegungen

Im Folgenden werden beispielhaft verschiedene Dachbelegungen aufgezeigt. Die Dachbelegungen von allen 100 untersuchten Gebäuden können auf der [Webseite](#) der ZHAW-Forschungsgruppe Erneuerbare Energien eingesehen werden.

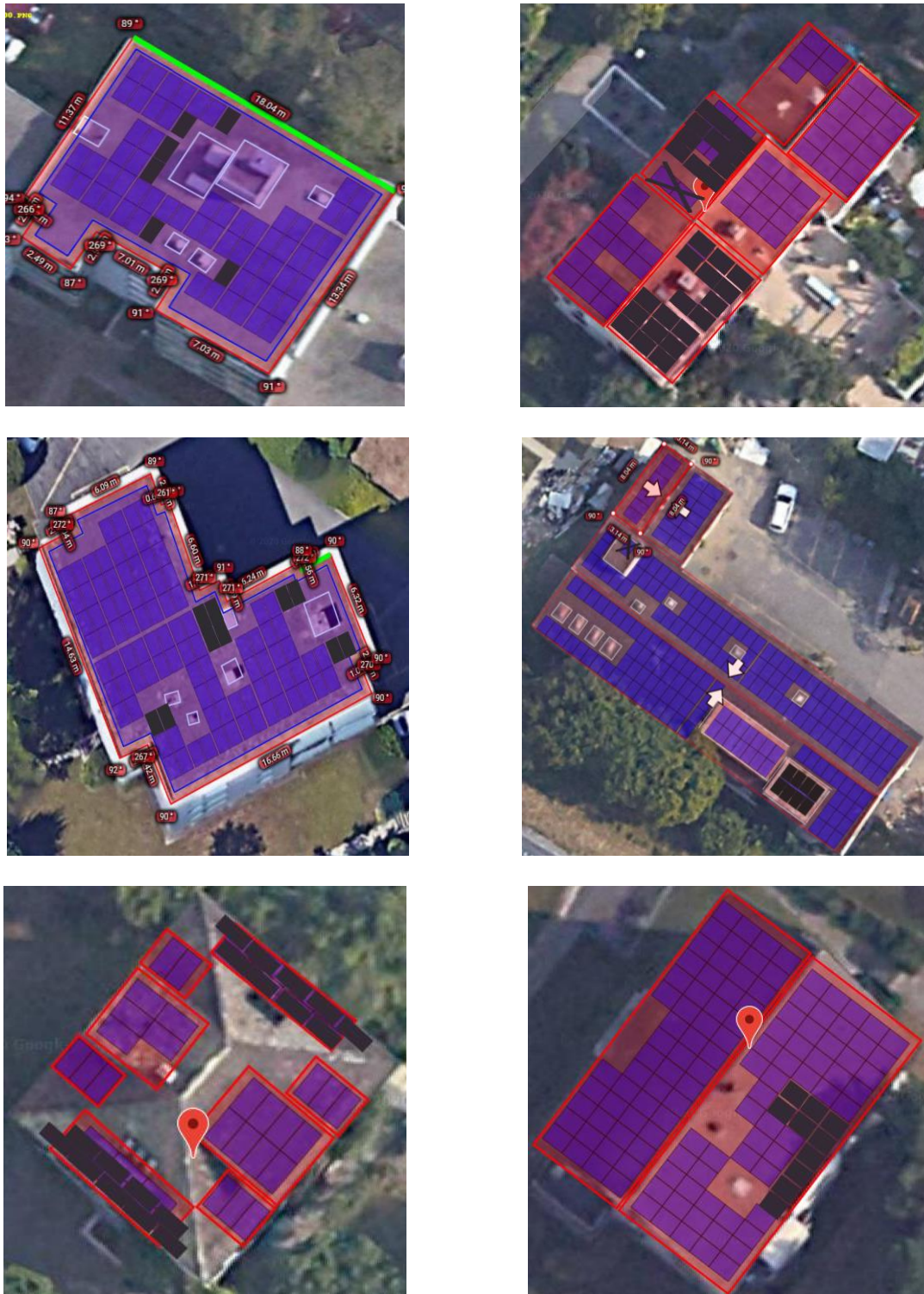


Abbildung 8: Sechs Dachbelegungen aus unserer Stichprobe. Die blauen Module wurden mit dem K2-Tool belegt und die schwarzen Module wurden nachträglich von Hand hinzugefügt, um eine möglichst hohe Belegung zu erreichen. Modul-anordnungen mit weniger als drei zusammenhängenden Modulen wurden gestrichen.