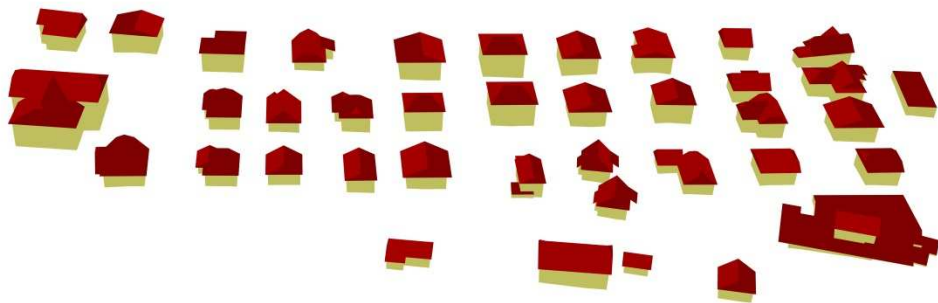




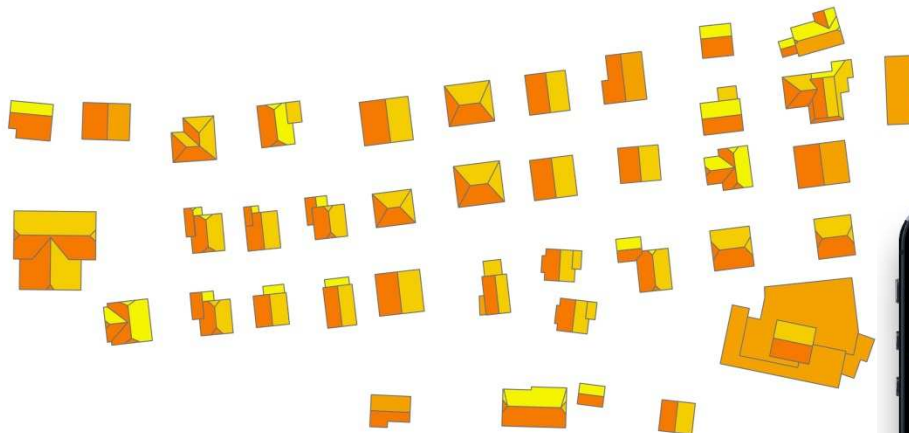
Daniel Klauser, 19.02.2016

Solarpotentialanalyse für Sonnendach.ch

Schlussbericht



3D Gebäude
zu
2D Dachflächen (Vogelperspektive)





Datum: 19.02.2016

Ort: Bern

Auftraggeber: Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmerin:
Genossenschaft Meteotest, Fabrikstrasse 14, 3012 Bern

Autor:
Daniel Klauser (Meteotest)

Begleitgruppe: Martin Hertach (BFE), Dominique Kröpfl (BFE), Reto Stöckli (MeteoSchweiz), Patrick Aeby (swisstopo)

BFE-Bereichsleitung: Martin Hertach (Dienst Geoinformation)

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/300186-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 3 |
| Management Summary | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| 1. Aufgabenstellung | 7 |
| 2. Datengrundlagen | 9 |
| 2.1. Klimadaten | 9 |
| 2.2. Geodaten | 9 |
| 2.2.1. Gebäudegeometrien | 9 |
| 2.2.2. Geländedaten | 10 |
| 2.3. Statistische Daten | 11 |
| 3. Bearbeitungsmethodik | 12 |
| 4. Ableitung Geometrie | 13 |
| 4.1. Bereinigung Dachflächen aus swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | 13 |
| 4.2. Ableitung Ausrichtung, Neigung und Fläche für Dachflächen | 16 |
| 4.3. Bereinigung Fassaden aus swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | 16 |
| 5. Berechnung Einstrahlungswerte | 18 |
| 5.1. Horizontberechnung für Dachflächen | 18 |
| 5.2. Horizontberechnung für Fassadenflächen | 22 |
| 5.3. Interpolation Strahlungswerte | 22 |
| 5.4. Strahlungsberechnung geneigte Flächen mit Verschattung | 23 |
| 5.5. Klassifizierung der Dachflächen | 25 |
| 5.6. Klassifizierung der Fassadenflächen | 25 |
| 5.7. Parameter zur Berechnung von aktuellen Monatswerten | 26 |
| 6. Berechnung Ertrag Photovoltaik | 28 |
| 7. Berechnung Ertrag Solarthermie | 29 |
| 7.1. Interpolation Temperaturwerte | 29 |
| 7.2. Heizgradtage | 29 |
| 7.3. Zuordnung GWR zu swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | 30 |
| 7.4. Abschätzung Wärmebedarf | 34 |
| 7.5. Dimensionierung Solarthermieranlage | 36 |
| 7.6. Wärmeertrag | 36 |
| 7.7. Anzahl Duschgänge und Deckungsgrad Heizung | 37 |
| 8. Datenmodell | 38 |



| | |
|---|-----------|
| 9. Validierung | 41 |
| 9.1. Strahlungsdaten | 41 |
| 9.1.1. Vergleich mit Bodenmessstationen | 41 |
| 9.1.2. Validierung Parameter aktuelle Monatswerte | 43 |
| 9.2. Stromertrag | 44 |
| 9.2.1. Validierung mit langjährigen Messreihen der BFH Burgdorf | 44 |
| 9.2.2. Validierung mit Produktionswerten von KEV-Anlagen | 46 |
| 9.3. Wärmeertrag | 47 |
| 9.3.1. Validierung Näherungsformel | 47 |
| 9.3.2. Vergleich mit Messwerten existierender Anlagen | 48 |
| 10. Schlussbemerkungen | 49 |
| 11. Referenzen | 50 |

Management Summary

Die Nutzung der Sonnenenergie ist gemäss der nationalen Energiestrategie 2050 ein wichtiger Pfeiler der zukünftigen Energieversorgung. Sowohl die Photovoltaik (PV) als auch die Solarthermie sind wichtige Technologien für eine nachhaltige Energieversorgung. Das Potential von Solarenergie ist beträchtlich: gemäss der Energiestrategie 2050 können bis zum Jahr 2050 rund 20 Prozent des derzeitigen Strombedarfs durch Photovoltaik erzeugt und rund 10 Prozent der Wärmebedarfs durch Solarthermie gedeckt werden.

Im Rahmen der nationalen Energiestrategie 2050 und gemäss Energiegesetz (EnG, SR 730.0) sollen einheimische und erneuerbare Energien verstärkt genutzt werden. Als geeignetes Fördermittel stellt Sonnendach.ch alle Hausdächer und Fassaden gemäss ihrer Eignung für die Nutzung von Solarenergie dar. Damit soll das Potential der Solarenergienutzung sichtbar werden. Sonnendach.ch dient einerseits zur Information für interessierte Privatpersonen, andererseits als Datengrundlage für weitergehende Auswertungen und als Planungsgrundlage, z.B. für Potentialstudien durch Kantone und Gemeinden oder für die Stromnetzplanung.

Die Datengrundlagen für die Erstellung von Sonnendach.ch sind in der Bundesverwaltung vorhanden, so dass Sonnendach.ch flächendeckend erstellt werden kann und eine periodische Aktualisierung möglich ist. Die 3D-Informationen über die Gebäude stammen aus dem Datensatz swissBUILDINGS^{3D} 2.0 des Bundesamts für Landestopographie (swisstopo). Weiter werden diverse Geländemodelle von swisstopo für die Verschattungsanalyse verwendet. Die Klimadaten (Sonneneinstrahlung und Temperatur) steuert das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz bei. Das Bundesamt für Energie (BFE) leitet das Projekt und ist für die Umsetzung der Benutzeroberfläche verantwortlich.

Mit der Erarbeitung der Daten für Sonnendach.ch wurde die Firma Meteotest beauftragt. Die Berechnung umfasst eine ganze Reihe von Informationen für jede einzelne Dachfläche, angefangen mit der Sonneneinstrahlung über die Photovoltaikproduktion bis zu den Heizgradtagen und der Anzahl Duschgänge, die mit einer Solarthermieanlage auf dieser Dachfläche möglich werden. Diese Berechnungen müssen für rund 10 Millionen Dachflächen in der Schweiz durchgeführt werden.

Der vorliegende Schlussbericht gibt detailliert Auskunft über die Datengrundlagen, die Berechnungsmethodik und die in Sonnendach.ch enthaltenen Ergebnisse. Er richtet sich an Fachpersonen, welche besser verstehen wollen, wie die Angaben in Sonnendach.ch zu Stande kommen.

Bis die URL für die Publikation bekannt war, lief das Projekt Sonnendach.ch unter der Bezeichnung "Solarkataster Schweiz". Die zwei in diesem Bericht erwähnten Beilagen, die in einem früheren Projektstadium durch externe Experten erstellt wurden, verwenden deshalb noch die Bezeichnung "Solarkataster Schweiz" anstelle von Sonnendach.ch.



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------|--|
| 2D | 2-dimensional |
| 3D | 3-dimensional |
| BFE | Bundesamt für Energie |
| DIR | Direktstrahlung horizontal |
| DIF | Diffusstrahlung horizontal |
| DOM | Digitales Oberflächenmodell |
| GH | Globalstrahlung horizontal |
| GK | Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche |
| GWR | Gebäude- und Wohnungsregister |
| KEV | Kostendeckende Einspeisevergütung |
| kDOM | Kombiniertes digitales Oberflächenmodell |
| MeteoSchweiz | Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie |
| PV | Photovoltaik |
| SB | swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 |
| SIA | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| swisstopo | Bundesamt für Landestopographie |
| UUID | Universally Unique Identifier |

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung von Seiten BFE für die Berechnung von Sonnendach.ch sieht wie folgt aus:

Arbeitspaket 1: Berechnung der Solarpotentiale der Dachflächen.

- Für jede im Geodatenprodukt swissBUILDINGS^{3D} 2.0 enthaltene Dachfläche werden folgende allgemeine Kennwerte errechnet: Nutzbare Dachfläche in m², Ausrichtung der Dachfläche (Grad gegenüber Nordausrichtung im Uhrzeigersinn) und Neigung zur Horizontalen (Grad).
- Für die Potentialaussage für eine Photovoltaikanlage werden für jede Dachfläche folgende Werte errechnet: Mittlere Einstrahlung auf die Dachfläche in kWh/m²/Jahr, gesamte Einstrahlung auf die Dachfläche in kWh/Jahr und elektrischer Ertrag in kWh/Jahr.
- Für die Potentialaussage für eine Solarthermieanlage werden für jede Dachfläche folgende Werte errechnet: Mittlere Einstrahlung auf die Dachfläche in kWh/m²/Jahr und gesamte Einstrahlung auf die Dachfläche in kWh/Jahr. Zudem sollen für die einfache Verständlichkeit der Potentiale zwei Kenngrössen aus dem Alltag angegeben werden:
(1) Anzahl Duschgänge, die möglich wären und (2) zu wie viel Prozent es möglich wäre, das Haus mit Solarwärme zu beheizen (notwendige Angaben wie Volumen, Alter, Jahr der letzten Sanierung des Gebäudes sind in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 und/oder im eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister enthalten).

Arbeitspaket 2: Klassifizierung der Dachflächen nach der Eignung für die Nutzung von Solarenergie.

- In Absprache mit dem BFE sind geeignete Abgrenzungen von Eignungsklassen (für Photovoltaik und Solarthermie) festzulegen. Dies im Kontext der Gemeinde, des Kantons und der Schweiz.
- Die Symbolisierung der Dachflächen (Farbwerte etc.) gemäss festgelegten Klassen wird in einem Darstellungsmodell definiert und dokumentiert.

Arbeitspaket 3: Berechnung von Parametern pro Dachfläche, um mit einer linearen Korrektur monatliche Produktionsdaten zu errechnen.

- Die Umrechnung von horizontaler Einstrahlung auf die Einstrahlung auf die geneigte Dachfläche kann mit einer Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) auf Monatsbasis pro Dachfläche angenähert werden. Dafür müssen einmalig 36 Parameter (a , b , $c \times 12$ Monate) pro Dachfläche anhand der zur Verfügung stehenden langjährigen Strahlungsdaten abgeleitet werden.

Arbeitspaket 4: Solarpotentiale der Haus-Fassaden

- Es sind die gleichen Aufgaben wie für Dachflächen zu lösen (siehe Arbeitspakete 1 bis 3).

Arbeitspaket 5: Validation sämtlicher Ergebnisse anhand unabhängiger Messdaten

- Der Fehlerbereich der errechneten Ergebnisse ist zu quantifizieren und nachzuweisen. Die gewählte Methodik für die Validation ist zu dokumentieren.



Arbeitspaket 6: Automatisierung der Berechnungen, damit Sonnendach.ch mit geringem Aufwand mit neuen oder aktualisierten Dachflächen ergänzt werden kann.

- swisstopo ergänzt das Produkt swissBUILDINGS^{3D} 2.0 regelmässig mit neuen Dachflächen. Es muss daher gewährleistet sein, dass Sonnendach.ch einfach, zeitnah und ohne grossen Aufwand um die neuen (oder auch aktualisierten) Dachflächengeometrien ergänzt werden kann.
- Es muss jederzeit nachvollziehbar sein, welche im swisstopo-Produkt swissBUILDINGS^{3D} 2.0 enthaltenen Dachflächen bereits für Sonnendach.ch prozessiert wurden (Übernahme des Universal Unique Identifiers und des Zeitstandes aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0).

Arbeitspaket 7: Bereitstellung sämtlicher Ergebnisse in einer dokumentierten Geodatenbank

- Sämtliche Ergebnisse werden dem BFE in einer ESRI File Geodatabase übergeben. Das Datenmodell ist in Absprache mit dem BFE zu Beginn des Projektes zu erarbeiten und zu dokumentieren. Die 3D-Geometrien der Dachflächen in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 sind auf zwei Dimensionen im Endprodukt zu reduzieren und als normale Polygon-Geometrien abzubilden.
- Unmittelbar nach Festlegung des Datenmodells ist eine File Geodatabase gemäss dem Modell zu erstellen, mit einigen Musterdaten zu versehen und dem BFE zu übergeben. So kann das BFE in Zusammenarbeit mit swisstopo die Integration der effektiven Daten in die Bundes Geodaten-Infrastruktur vorbereiten.

2. Datengrundlagen

Für Sonnendach.ch werden drei Gruppen von Grundlagendaten verwendet: Klimadaten (Strahlung und Temperatur), Geodaten (Gebäudegeometrie und Geländedaten) und statistische Daten (Gebäude- und Wohnungsregister). Die **Tabelle 1** zeigt einen Überblick über die verwendeten Datengrundlagen.

| Datensatz | Quelle | Stand | Inhalt | Verwendung |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-------------------------------|
| swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | swisstopo | laufend aktualisiert | 3D-Gebäudemodell | Gebäudegeometrie |
| Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) | Bundesamt für Statistik | 1.3.2015 | Statistische Daten Gebäude und Wohnungen | Wärmebedarf |
| swissALTI ^{3D} | swisstopo | 1.1.2015 | Digitales Terrainmodell, 2 m Auflösung | Verschattung |
| Digitales Oberflächenmodell (DOM) | swisstopo | 1.1.2008 | Digitales Oberflächenmodell, 0.5 m Auflösung | Verschattung |
| SRTM | US Geological Survey | Version 2.1 (2009) | Digitales Terrainmodell, ca. 100 m Auflösung | Verschattung |
| Klimadaten | MeteoSchweiz | 1.3.2015 | 2004 – 2014, ca. 2 km Auflösung | Solarstrahlung und Temperatur |

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Datengrundlagen.

2.1. Klimadaten

Als Datengrundlage werden von MeteoSchweiz aus Satellitendaten abgeleitete Globalstrahlungsdaten und an Bodenmessstationen gemessene und räumlich gegitterte Temperaturdaten für die Jahre 2004 – 2014 verwendet. Mehr dazu in Abschnitt 5.3 (Strahlungsdaten) und 7.1 (Temperaturdaten).

2.2. Geodaten

2.2.1. Gebäudegeometrien

Als primäre Datengrundlage wird der Datensatz swissBUILDINGS^{3D} 2.0 von swisstopo verwendet (siehe Referenz [1]). swissBUILDINGS^{3D} 2.0 ist ein Vektordatensatz, der Gebäude als 3D-Modell mit Dachformen und Dachüberständen darstellt. Die 3D-Geometrien der Dachflächen und Fassaden im swissBUILDINGS^{3D} 2.0 werden für Sonnendach.ch auf zwei Dimensionen reduziert und als 2D-Polygon-Geometrien (Dachflächen), respektive 2D-Polyline-Geometrien (Fassaden), dargestellt. Es werden die Dachlandschaft direkt aus der Produktion und die abgeleiteten Fassaden als separate Datensätze verwendet. Mehr dazu in den Abschnitten 4.1 und 4.3.

2.2.2. Geländedaten

Für die Verschattungsanalyse werden neben den Gebäudegeometrien aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 das swissALTI^{3D} [2] und das digitale Oberflächenmodell DOM [3] verwendet. Das swissALTI^{3D} ist ein digitales Höhenmodell mit einer Auflösung von 2 m, welches die ganze Oberfläche der Schweiz ohne Bewuchs und Bebauung beschreibt. Es wird in einem Nachführungszyklus von 6 Jahren aktualisiert. Für die Ersterfassung von Sonnendach.ch wird das swissALTI^{3D} Stand 1.1.2015 verwendet. Das DOM bildet die Form der Erdoberfläche ab, wobei alle beständigen und sichtbaren Landschaftselemente wie Boden, Bewuchs, Wälder, Hochbauten und weitere Kunstbauten einbezogen sind. Das DOM ist für Gebiete der Schweiz unterhalb ca. 2'000 m. ü. M. verfügbar. Es wurde 2002 bis 2007 erstellt und seither nicht mehr aktualisiert. Es wird das Grid mit einer Auflösung von 2 m verwendet und zu einer Auflösung von 0.5 m interpoliert, um die gleiche Auflösung zu erhalten, wie das aus den swissBUILDINGS^{3D} 2.0-Daten gewonnene Raster.

Für Gebiete ausserhalb der Schweiz wird weiter das Höhenmodell SRTM verwendet. SRTM-Daten sind Fernerkundungsdaten der Erdoberfläche, die bei der STS-99 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [4] im Februar 2000 aus dem Weltraum aufgezeichnet wurden. Die Auflösung beträgt rund 100 m.

Für die Verschattungsanalyse wird ein aus den genannten Datensätzen generiertes, kombiniertes digitales Oberflächenmodell (kDOM) in verschiedenen Auflösungen verwendet. Dabei gilt die Hierarchie: swissBUILDINGS^{3D} 2.0 → DOM → swissALTI^{3D} → SRTM. Für ein Beispielgebiet ist in **Abbildung 1** das DOM und in **Abbildung 2** das kombinierte digitale Oberflächenmodell kDOM dargestellt. Die Ergänzung des DOM mit einem aus dem swissBUILDINGS^{3D} 2.0 gewonnenen Raster ist insbesondere wichtig, um die neuen Gebäude in der Verschattungsanalyse zu berücksichtigen, da das DOM in den meisten Gebieten schon über 10 Jahre alt ist.

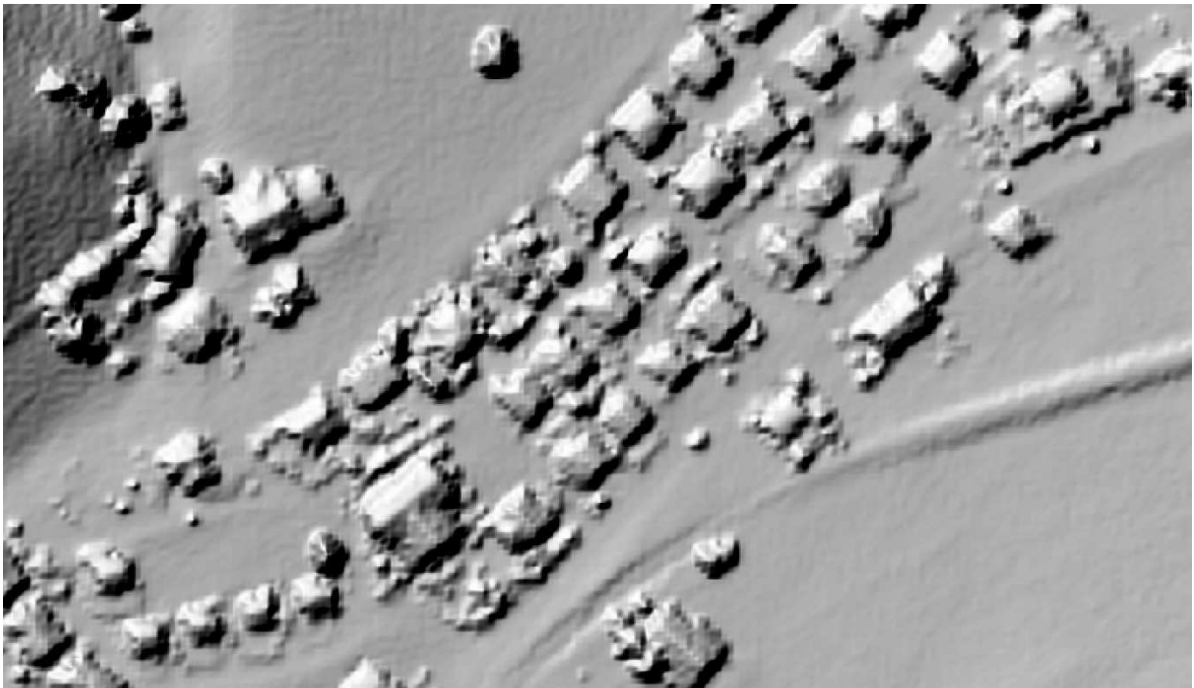


Abbildung 1: Hillshade des DOM für ein Beispielgebiet.



Abbildung 2: Hillshade des kombinierten digitalen Oberflächenmodells (kDOM) mit der Hierarchie: swissBUILDINGS^{3D} 2.0 → DOM → swissALTI^{3D} → SRTM. Weil das DOM in diesem Ausschnitt flächendeckend verfügbar ist, kommen swissALTI^{3D} und SRTM nicht zum Zug. Im Vergleich zu **Abbildung 1** fallen die scharfen Dachformen und die neuen Gebäude im linken Bildbereich auf.

Durch das Alter des DOM von gut 10 Jahren in den meisten Gebieten, ergibt sich eine Ungenauigkeit bei der Verschattung durch Bäume, die nahe bei Gebäuden stehen. Diese können in der Zwischenzeit gewachsen oder gefällt worden sein.

2.3. Statistische Daten

Für die Abschätzung des Heiz- und Warmwasserbedarfs in einem Gebäude werden Daten aus dem Eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) [5] verwendet. Es sind dies Gebäudebaujahr, Gebäudebauperiode, Gebäudekategorie und Wohnungsfläche. Für Sonnendach.ch wird das GWR Stand 1.3.2015 verwendet. Mehr zur Abschätzung des Wärmebedarfs in Abschnitt 7.4.

3. Bearbeitungsmethodik

Die Berechnung von Sonnendach.ch erfolgt mit der Programmiersprache Python unter Verwendung des ArcPy Moduls von ArcGIS. Alle notwendigen Eingangsdaten (Geodaten, Klimadaten, Gebäudedaten) werden mit Python eingelesen und die Berechnungen pro Gebäude resp. Dachfläche oder Fassade in Python durchgeführt. Die Resultate werden in die entsprechenden Feature Classes und Tabellen für Dachflächen und Fassaden eingefügt (vgl. **Abbildung 3**).

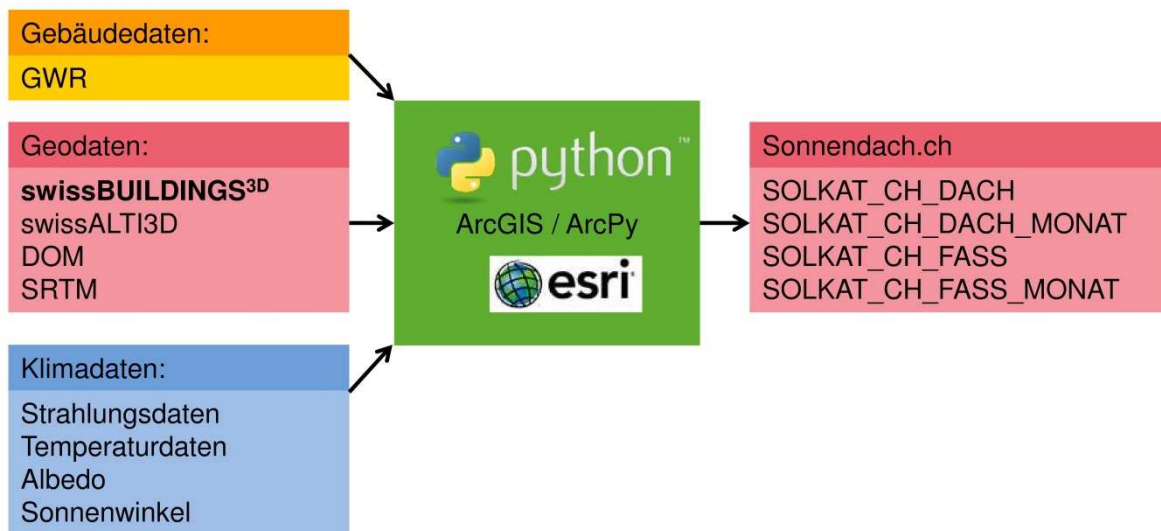


Abbildung 3: Übersicht über die Bearbeitungsmethodik mit den verwendeten Datengrundlagen.

Die Prozessierung der Daten erfolgt sektorweise, wobei die Landeskarten 1:25'000 Blätter als Sektoren verwendet werden. Innerhalb der Sektoren erfolgt die Prozessierung in 250 x 250 m grossen Kacheln. Da sich benachbarte Gebäude überlappen können (vgl. Abschnitt 4.1), muss darauf geachtet werden, dass sich überlappende Gebäude dem gleichen Sektor und innerhalb des Sektors der gleichen Kachel zugeordnet werden.

4. Ableitung Geometrie

Die geometrischen Eigenschaften der Dachflächen und Fassaden in Sonnendach.ch werden aus dem Datensatz swissBUILDINGS^{3D} 2.0 abgeleitet. Während der Datensatz swissBUILDINGS^{3D} 2.0 die Gebäude als 3D-Geometrien enthält, werden in Sonnendach.ch die Dachflächen als projizierte Polygone (Rechtecke), also als 2D-Geometrien dargestellt, wie sie aus der Vogelperspektive sichtbar sind. Liegen mehrere Dachflächen übereinander, ist in Sonnendach.ch die jeweils höchstgelegene Dachfläche sichtbar. Die Fassaden werden in Sonnendach.ch als projizierte Polylinien, also ebenfalls als 2D-Geometrien dargestellt. Es werden nur die am äusseren Rand der Gebäude gelegenen Fassaden dargestellt (mehr dazu in Abschnitt 4.3).

4.1. Bereinigung Dachflächen aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0

Bei der Bereinigung der Dachflächen aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 geht es darum, die 3D-Gebäudegeometrien in eine 2D-Darstellung der Dachflächen umzuwandeln, für diese Dachflächen aber alle notwendigen 3D-Informationen (Ausrichtung, Neigung, Verschattung) abzuspeichern. Die Gebäudegeometrien in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 liegen als 3D-Multipatch-Features vor. Sonnendach.ch beinhaltet nicht überlappende 2D-Polygon-Features. In **Abbildung 4** ist diese Reduzierung für ein Beispielgebiet dargestellt.

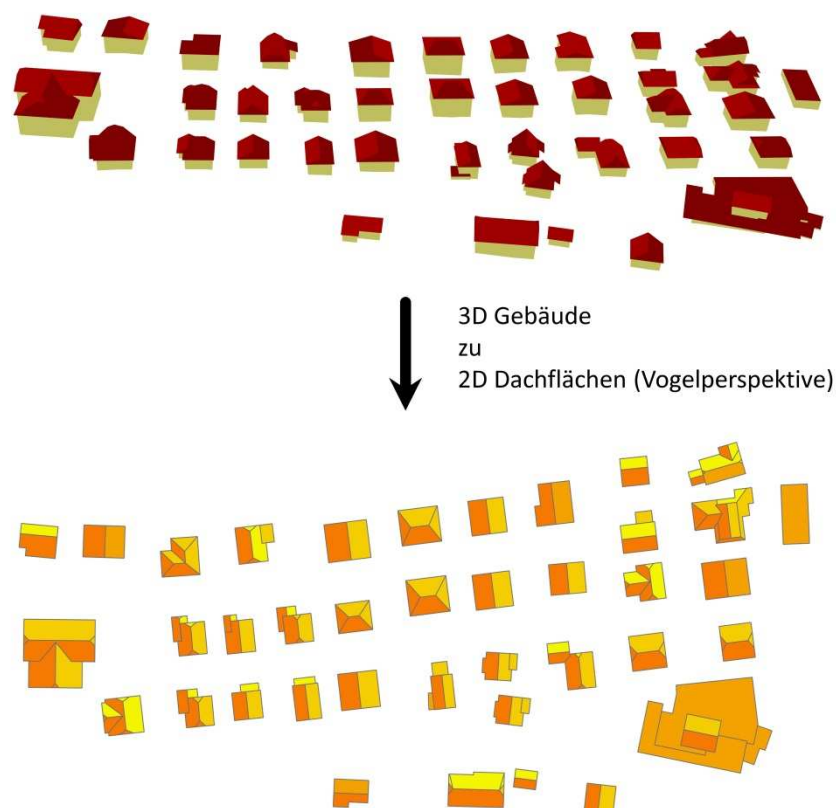


Abbildung 4: Reduzierung der 3D-Daten aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (3D-Multipatch-Features) in 2D-Polygon-Features für Sonnendach.ch.

Die vollständigen Gebäude im swissBUILDINGS^{3D} 2.0 sind 3D-Multipatch-Features aus triangulierten Teilflächen (vgl. **Abbildung 5**). Um die (meist rechteckigen) Dachflächen zu erhalten, müssen die Dreiecksflächen, welche zur gleichen Dachfläche gehören, wieder verschmolzen werden. Dazu wird folgende Methodik angewendet: zwei Flächen werden verschmolzen, wenn sie sich in einer Linie berühren und der Winkel zwischen den Normalenvektoren der beiden Flächen kleiner ist als ein definierter Grenzwert. Tests haben gezeigt, dass es sehr schwierig ist, diesen Grenzwert festzulegen. Ist der Grenzwert zu tief, werden viele Flächen nicht verschmolzen, die zusammengehören würden. Ist der Grenzwert zu hoch, werden viele benachbarte Flächen fälschlicherweise verschmolzen.

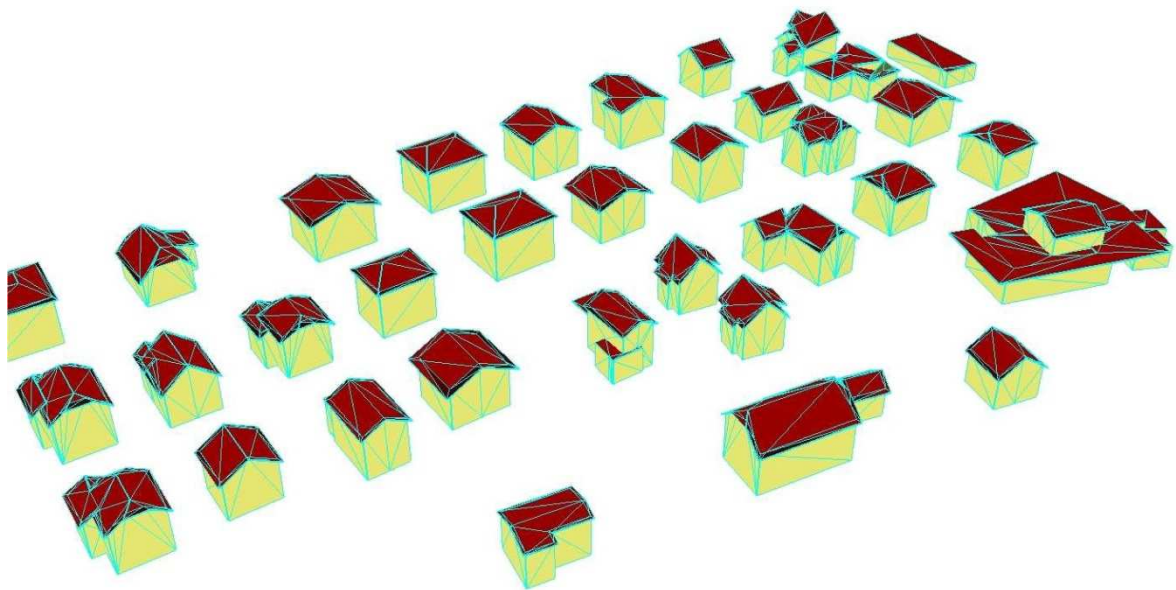


Abbildung 5: 3D-Multipatch-Features aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (3D-Multipatch-Features) mit den Teilflächen durch hellblaue Linien unterteilt.

Aus diesem Grund wurde entschieden, die Dachflächen aus den Rohdaten der Produktionsphase von swissBUILDINGS^{3D} 2.0 zu verwenden. Dabei handelt es sich um die bei der Produktion photogrammetrisch erfassten Dachflächen. Der Vorteil dieser Rohdaten liegt darin, dass mit wenigen Ausnahmen (nachbearbeitete Gebäude), die Teilflächen bereits den Dachflächen entsprechen und ein nachträgliches Verschmelzen nicht mehr notwendig ist. Im Gegensatz zu den fertigen Daten im swissBUILDINGS^{3D} 2.0 überlappen sich bei den Dachflächen aus der Produktionsphase aber die einzelnen Teildachflächen (ineinander gehende Dachflächen, vgl. **Abbildung 6**). Diese müssen daher bereinigt werden, so dass nur die am höchsten gelegene Dachfläche übrig bleibt.

Eine Bereinigung ist auch bei Dachflächen notwendig, die unter einer höher gelegenen Dachfläche liegen (z.B. Garagendach teilweise unter dem Dachvorsprung des Hauptdaches). Diese wäre auch bei der Verwendung der fertigen Gebäude aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 notwendig. Bei der Verwendung der Dachflächen aus der Produktion ist lediglich die Überlappung grösser (vgl. **Abbildung 7**).

Das Ineinandergehen und Überlappen von Dachflächen kann sowohl innerhalb des gleichen Objektes (Gebäudes) in swissBUILDINGS^{3D} 2.0, wie auch zwischen benachbarten Gebäuden auftreten. Die Bereinigung muss daher nicht nur für jedes Gebäude, sondern auch paarweise zwischen Gebäuden, deren Grundrisse sich überlappen, durchgeführt werden.

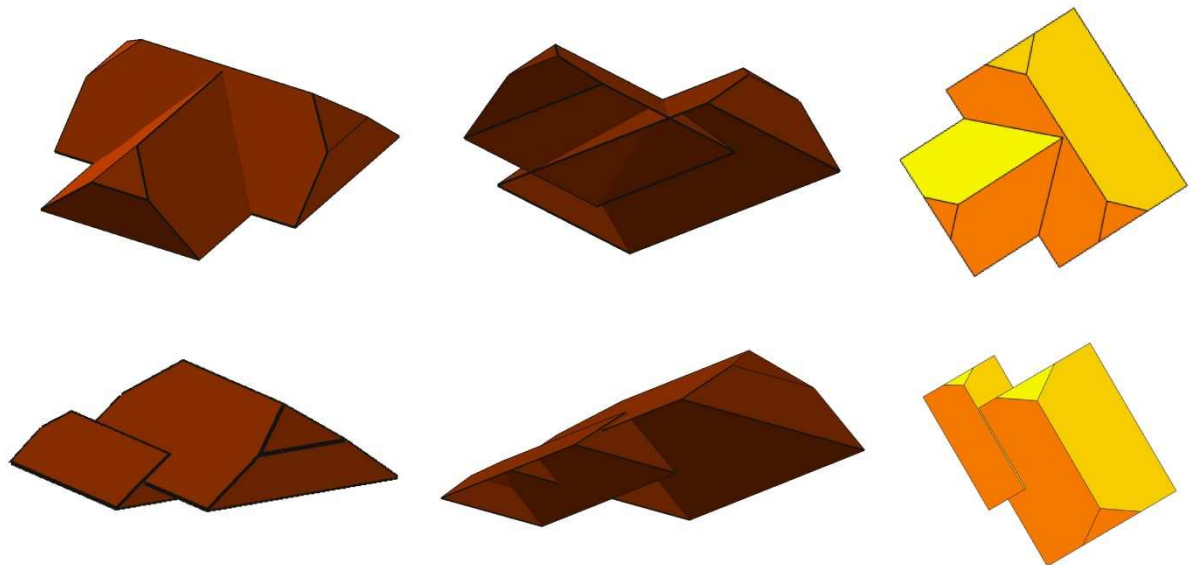


Abbildung 6: Beispiele für ineinander gehende Dachflächen aus der Produktion von swissBUILDINGS^{3D} 2.0. Jeweils links die Ansicht schräg von oben, in der Mitte die Ansicht schräg von unten in die Dächer hinein und rechts die bereinigten Dachflächen für Sonnendach.ch mit Blick aus der Vogelperspektive (nicht überlappende Polygone). Das Beispiel oben ist ein Objekt (Gebäude) in swissBUILDINGS^{3D} 2.0, im Beispiel unten sind es zwei Objekte (Gebäude) mit unterschiedlichen Objektnummern (UUID).

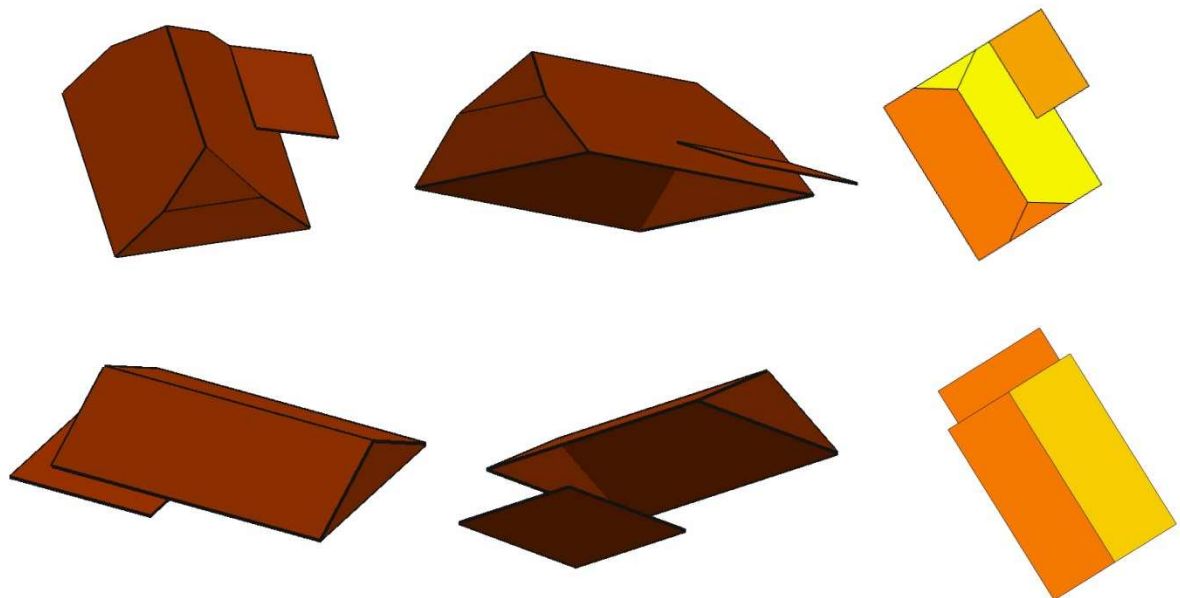


Abbildung 7: Beispiele für übereinander liegende Dachflächen. Jeweils links die Ansicht schräg von oben, in der Mitte die Ansicht schräg von unten in die Dächer hinein und rechts die bereinigten Dachflächen für Sonnendach.ch mit Blick aus der Vogelperspektive (nicht überlappende Polygone). Das Beispiel oben ist ein Objekt (Gebäude) in swissBUILDINGS^{3D} 2.0, im Beispiel unten sind es zwei Objekte (Gebäude) mit unterschiedlichen Objektnummern (UUID).

Trotz der Verwendung der Dachflächen aus der Produktion gibt es immer noch vereinzelt Gebäude mit triangulierten Dachflächen. In diesen Fällen werden zwei Flächen verschmolzen, wenn sie sich in einer Linie berühren und der Winkel zwischen den Normalenvektoren der beiden Flächen kleiner ist als 8 Grad. Dieser Winkel hat sich bei Testrechnungen als optimal erwiesen. Trotzdem können auch in Sonnendach.ch noch vereinzelt triangulierte Dachflächen auftauchen.

4.2. Ableitung Ausrichtung, Neigung und Fläche für Dachflächen

Während der Bereinigung der Dachflächen bleiben die 3D-Informationen erhalten. Die Projektion auf 2D-Polygone erfolgt erst beim Speichern der Daten in die resultierende Feature Class. Für jede bereinigte Dachfläche wird die Ausrichtung und Neigung berechnet, indem zuerst der Normalenvektor auf die Dachfläche (Vektor senkrecht auf der Ebene der Dachfläche) berechnet wird und daraus Ausrichtung und Neigung abgeleitet werden. Die Fläche der Dachfläche wird aus der projizierten Fläche mit Hilfe der Neigung berechnet.

4.3. Bereinigung Fassaden aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0

Die Fassadenflächen in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 werden nicht direkt photogrammetrisch erfasst, sondern automatisiert abgeleitet. Die Fassaden gehen unter Berücksichtigung der Dachvorsprünge senkrecht nach unten. Um zu vermeiden, dass Gebäude in 3D-Darstellungen in der Luft stehen, gehen die Fassaden vom tiefsten Geländepunkt noch drei Meter in den Boden hinein. Dies ist bei der Berechnung der Fassadenflächen für Sonnendach.ch zu berücksichtigen. Da die Fassadenflächen automatisiert abgeleitet werden, liegen sie als 3D-Multipatches mit triangulierten Teilflächen vor. Für die Berechnung von Sonnendach.ch stehen die Fassaden als separater Datensatz zur Verfügung (Gebäude ohne Dachflächen und Boden, vgl. **Abbildung 8**).

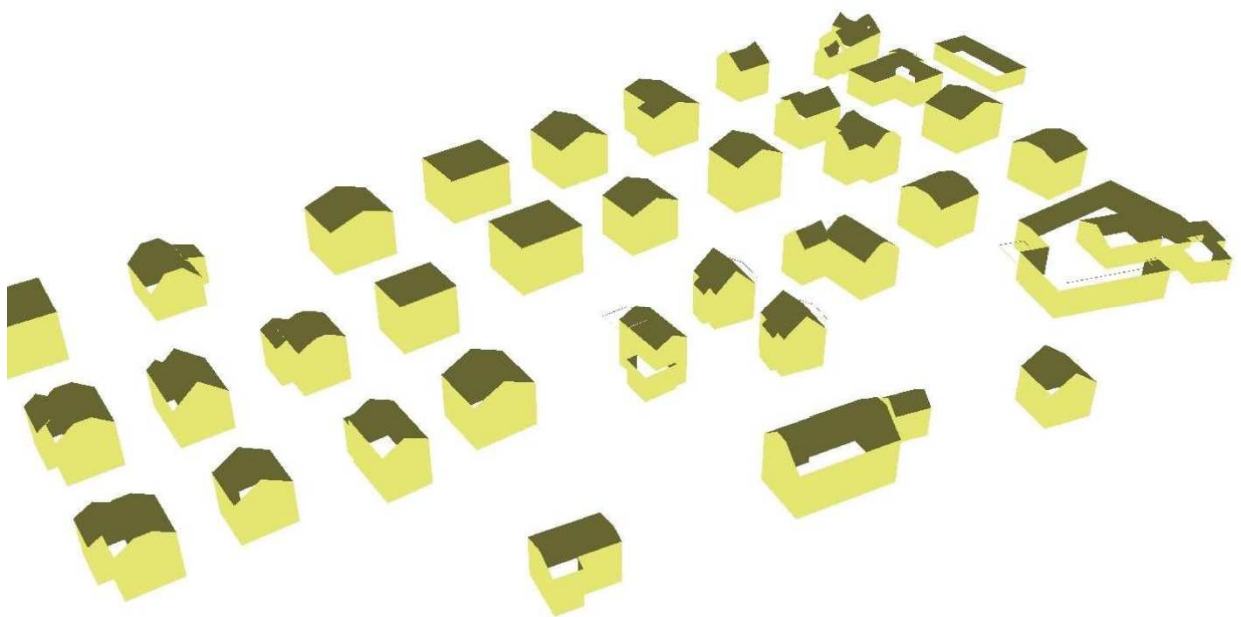


Abbildung 8: Fassaden der Gebäude aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (3D-Multipatch-Features) für den gleichen Ausschnitt wie die ganzen Gebäude in **Abbildung 5**.

Um eine verständliche und übersichtliche Darstellung zu erhalten, werden die Grundrisse sich überlappender Gebäude miteinander verschmolzen (dissolve) und nur Fassaden am äusseren Rand dieser verschmolzenen Grundrisse verarbeitet. In **Abbildung 9** sind die Fassaden für ein Beispielgebiet dargestellt. Eine Darstellung mit allen Fassaden (unten links im Bild) wirkt sehr unübersichtlich und ist kaum verständlich. Werden hingegen nur die Fassaden am äusseren Rand der verschmolzenen Grundrisse betrachtet, ist die Darstellung übersichtlicher und damit benutzerfreundlicher.

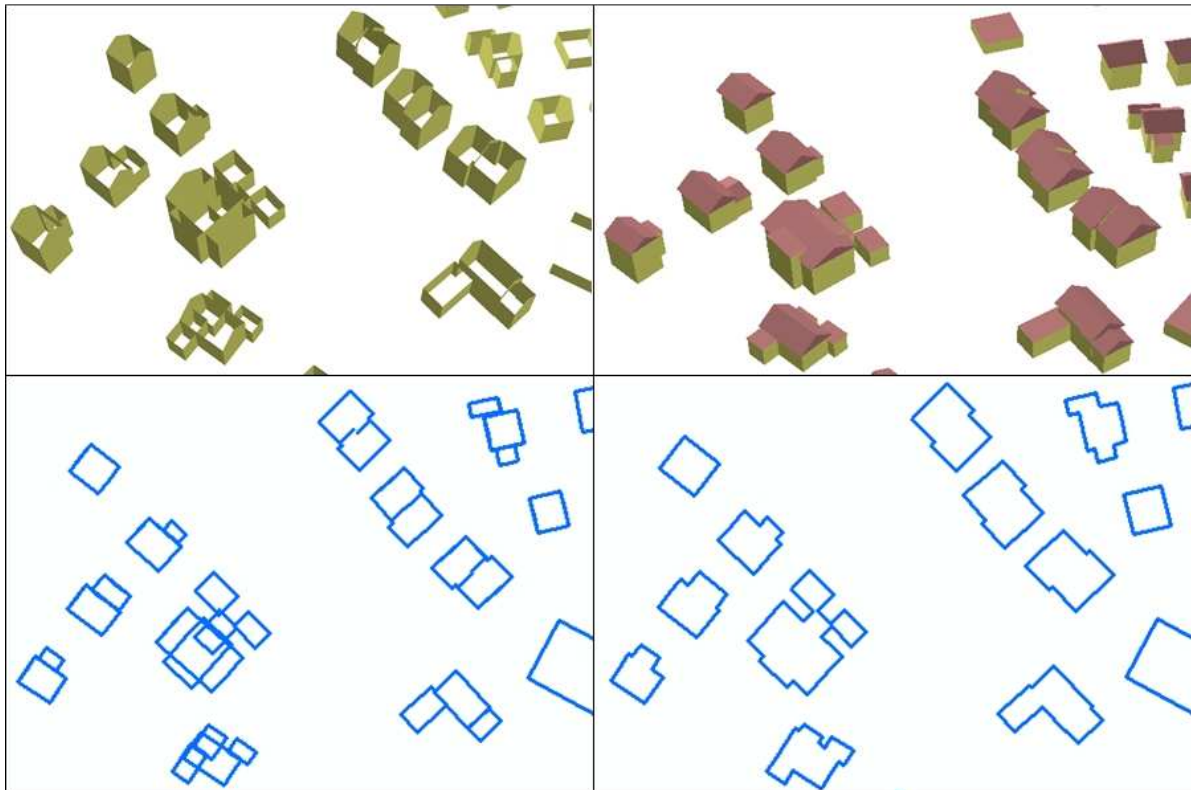


Abbildung 9: Oben links: Fassaden aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (3D-Multipatch-Features). Oben rechts: Gesamte Gebäude aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (3D-Multipatch-Features). Unten links: Projektion der Fassaden (Vogelperspektive). Unten rechts: Nur äussere Fassaden der verschmolzenen Grundrisse.

Da die Fassadenflächen als triangulierte Teilflächen vorliegen, müssen diese zuerst verschmolzen werden. Zwei Fassadenflächen werden verschmolzen, wenn sie sich in einer Linie berühren und die gleiche Ausrichtung aufweisen. Da die Polygonklasse von ArcPy keine vertikalen Polygone erzeugen kann (Polygone mit einer projizierten Fläche von Null), müssen alle Dachflächen einer Fassade zuerst in ein lokales Koordinatensystem transformiert werden, bevor die Verschmelzung durchgeführt werden kann.

Für die Berechnung der Fläche der Fassaden wird die Geländehöhe aus dem swissALTI^{3D} berücksichtigt. Die angegebene Fläche der Fassade berücksichtigt nur Teile, die über der Erdoberfläche gemäss swissALTI^{3D} liegen, diese aber vollständig. Es wird keine Reduktion aufgrund von Fenstern oder ähnlichem gemacht, genauso wenig wie bei Dachflächen eine Reduktion aufgrund von Kaminen oder Dachfenstern vorgenommen wird, da diese Information nicht in den Grundlagendaten enthalten ist. Bei Potentialstudien basierend auf den Daten in Sonnendach.ch sollten diese Faktoren aber miteinbezogen werden.



5. Berechnung Einstrahlungswerte

Für die Berechnung der Einstrahlungswerte auf eine Dachfläche werden einerseits die Strahlungswerte auf die horizontale Ebene an diesem Standort benötigt und andererseits der Horizont (die Horizontlinie) für die Verschattungsanalyse. Gerade bei grossen Dachflächen kann der Horizont innerhalb der Dachfläche erheblich variieren.

5.1. Horizontberechnung für Dachflächen

Weil der Horizont bei der Strahlungsberechnung auf geneigte Flächen unter Berücksichtigung der Verschattung nur linear einfließt (vgl. Abschnitt 5.4), kann ein "gemittelter" Horizont für jede Dachfläche berechnet und dieser in der Strahlungsberechnung verwendet werden. Das Ergebnis ist exakt gleich, wie wenn mit dem Horizont für jeden Punkt auf der Dachfläche die Strahlung berechnet und anschliessend über die gesamte Dachfläche gemittelt würde. Der "gemittelte" Horizont ist eine Matrix, welche für jeden Punkt der Himmelshalbkugel angibt, von welchem Teil der Dachfläche aus dieser Punkt sichtbar ist. Der Wert 0 bedeutet, dass dieser Punkt am Himmel von nirgends auf der Dachfläche sichtbar ist. Bei einem Wert von 0.5 ist der Punkt von der halben Dachfläche aus sichtbar, bei einem Wert von 1 von der ganzen Dachfläche. Die Auflösung der Horizontberechnung liegt bei fünf Grad horizontal (Azimutwinkel) und einem Grad vertikal (Zenitwinkel). Die Horizontmatrix wird in drei Detaillierungsgraden berechnet.

Zuerst wird für einen Referenzpunkt pro Gebäude (in der Mitte des Gebäudes) der Fernhorizont (Hügel und Berge) aus dem auf 100 m aggregierten kDOM berechnet. Ausserhalb der Schweiz wird das kDOM mit dem Geländemodell SRTM ergänzt. Zu diesem Zweck wird dieses auf eine Auflösung von ebenfalls 100 m interpoliert. Der Fernhorizont wird in einem Radius von 25 km berechnet. Da diese Horizontmatrix für einen fixen Referenzpunkt berechnet wird, ist ein Himmelselement entweder sichtbar oder nicht, d.h. die Horizontmatrix weist nur die Werte 1 (sichtbar) oder 0 (nicht sichtbar) auf (vgl. **Abbildung 10**, 1. Zeile).

In einem zweiten Schritt wird für jede Dachfläche der Horizont in mittlerer Entfernung berechnet. Dabei ist der Mittelpunkt der Dachfläche der Referenzpunkt, von dem aus der Horizont berechnet wird. Für den mittleren Horizont wird ein auf 10 m aggregiertes kDOM verwendet. Der Berechnungsradius beträgt 1 km. Analog zum Fernhorizont weist diese Horizontmatrix nur die Werte 1 (sichtbar) oder 0 (nicht sichtbar) auf (vgl. **Abbildung 10**, 2. Zeile).

In einem dritten Schritt wird der Nahhorizont berechnet. Dafür wird das kDOM mit einer Auflösung von 0.5 m verwendet. Die Berechnung erfolgt mit einer Auflösung von 0.5 x 0.5 m (auf die horizontale Ebene projiziert), d.h. es wird für alle Referenzpunkte in einem Gitter mit Gitterabstand 0.5 m die innerhalb der Dachfläche liegen, eine Horizontmatrix berechnet und diese Horizontmatrizen werden über die ganze Dachfläche gemittelt. Der Radius der Nahhorizontberechnung beträgt 100 m. Da bei der Berechnung des Nahhorizontes der Horizont für viele verschiedene Referenzpunkte erfolgt, kann die resultierende Horizontmatrix für den Nahhorizont alle Werte zwischen 0 und 1 aufweisen. Der Wert 0 bedeutet, dass dieses Himmelselement nirgends auf der Dachfläche sichtbar ist. Bei einem Wert von 0.5 ist dieses Himmelselement von der halben Dachfläche aus sichtbar, bei einem Wert von 1 von der Ganzen (vgl. **Abbildung 10**, 3. Zeile).

Aus diesen drei Horizontmatrizen wird schliesslich für jede Dachfläche ein kombinierter Horizont berechnet. Dabei werden technisch gesprochen die drei Horizontmatrizen elementweise verglichen und jeweils der tiefste Wert (mit der grössten Verschattung) in die kombinierte Horizontmatrix übernom-

men. Wenn also ein Himmelselement für einen Teil der Dachfläche aufgrund des Nahhorizontes sichtbar wäre (Wert > 0), aber aufgrund des Fernhorizontes nicht, so erscheint in der kombinierten Horizontmatrix der Wert 0 (nicht sichtbar) (vgl. **Abbildung 10**, 4. Zeile).

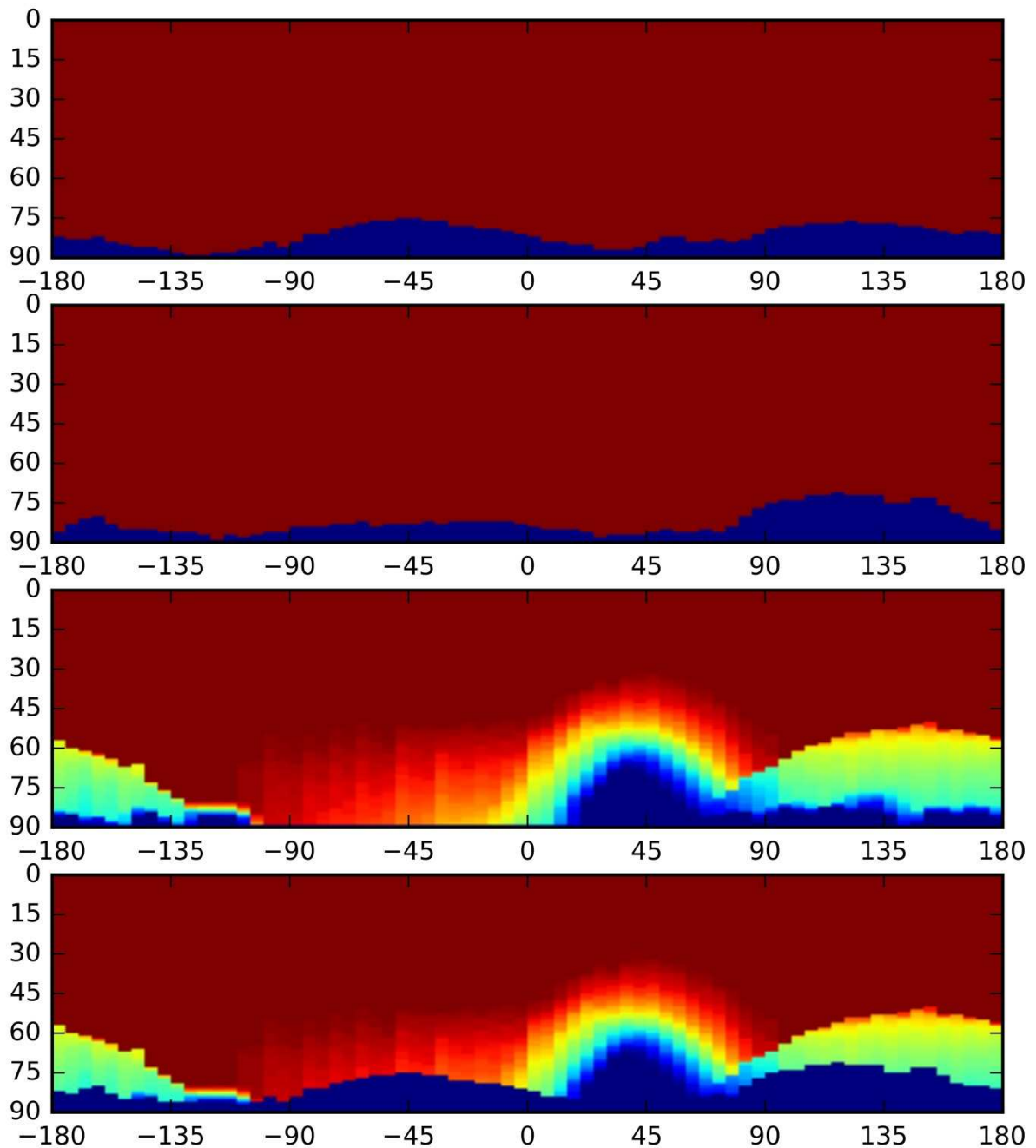


Abbildung 10: Beispiel für die Horizontberechnung für eine Dachfläche. Die horizontale Achse zeigt den Azimutwinkel ($-180^\circ = \text{Nord}$, $-90^\circ = \text{Ost}$, $0^\circ = \text{Süd}$, $90^\circ = \text{West}$). Die vertikale Achse zeigt den Zenitwinkel von $0^\circ = \text{Zenit}$ bis $90^\circ = \text{horizontal}$. Die Farbskala reicht von 0 (blau) = Himmelselement nirgends auf der Dachfläche sichtbar bis 1 (rot) = Himmelselement von der ganzen Dachfläche aus sichtbar. Von oben: Fernhorizont, mittlerer Horizont, Nahhorizont, kombinierter Horizont.



Die Horizontmatrix in **Abbildung 10** gehört zur Beispieldachfläche in **Abbildung 11**. Die Beispieldachfläche wird im Nahhorizont (vgl. **Abbildung 10**, 3. Zeile) im Südwesten (zwischen 0° und 90°) durch einen Baum und das Nachbargebäude verschattet. Die Verschattung wird stärker, je näher an Baum und Gebäude sich der Referenzpunkt auf der Dachfläche befindet. Für die nächsten Punkte reicht die Verschattung bis zu einem Zenitwinkel von gut 30° . Gemäss **Abbildung 11** (Mitte) würde man evtl. sogar einen noch höheren Horizont erwarten. Der Unterschied hat wohl damit zu tun, dass das DOM für dieses Gebiet aus dem Jahr 2000 stammt und die Tanne seither gewachsen ist. Weiter ist im Nahhorizont eine (teilweise) Verschattung zwischen -180° und -130° resp. 70° und 180° erkennbar. Es handelt sich dabei um den Eigenhorizont der Dachfläche. Da die Dachfläche nach Südosten ausgerichtet ist, ergibt sich auf der Dachfläche ein Horizont im Nordwesten. Auf den ersten Blick würde man erwarten, dass dieser Eigenhorizont überall 0 sein sollte (vollständige Verschattung). Wegen Randeffekten (Referenzpunkte am Rand der Dachfläche sehen den Eigenhorizont der Dachfläche nicht) ist dies aber nicht der Fall. Diese Randeffekte werden beseitigt, indem der Eigenhorizont einer Dachfläche bei der Strahlungsberechnung zusätzlich zu dem aus den Geländemodellen berechneten Horizont berücksichtigt wird.

Der mittlere Horizont (vgl. **Abbildung 10**, 2. Zeile) weist einen markanten Höhenzug im Nordwesten und eine weniger ausgeprägte Erhebung im Südwesten aus. Weil der mittlere Horizont mit einem Radius von 1 km berechnet wird, müssen diese innerhalb dieses Radius liegen. Beide sind in der Karte in **Abbildung 11** (oben) erkennbar.

Im Fernhorizont (vgl. **Abbildung 10**, 1. Zeile) ist die Erhebung im Südosten markanter, jene im Nordwesten etwas schwächer ausgeprägt. Erstere ist in **Abbildung 11** (Mitte) im Hintergrund gut sichtbar. Letztere ist weniger ausgeprägt, weil durch die geringere Auflösung (100 m) bei der Berechnung des Fernhorizontes die Hügel etwas geglättet werden. Im Bild in **Abbildung 11** (Mitte) erscheint die Erhebung im Südosten markanter, als es in der Horizontmatrix erscheint. Es ist generell so, dass visuell die Horizonthöhe überschätzt wird. Im vorliegenden Fall liegt die Erhebung rund 3 km vom Gebäude entfernt und ist rund 900 m höher als das Gebäude. Das ergibt eine Horizonthöhe von knapp 17° , resp. einen Zenitwinkel von gut 73° , wie das auch in etwa in **Abbildung 10** (1. Zeile) sichtbar ist.

In den kombinierten Horizont (vgl. **Abbildung 10**, 4. Zeile) fliessen alle drei Teilhorizonte ein. Der Baum, das Nachbargebäude und der Eigenhorizont vom Nahhorizont, der Hügel im Nordwesten vom mittleren Horizont und der Berg im Südosten vom Fernhorizont.

Die Auswirkung des Horizontes auf die Strahlung ist eher geringer, als man erwarten würde. Ein konstanter Horizont von 5° (Zenitwinkel 85°) reduziert die Strahlung sowohl auf eine horizontale Fläche als auch auf eine gegen Süden ausgerichtete und 30° geneigte Fläche um weniger als 1 %. Bei einem konstanten Horizont von 10° (Zenitwinkel 80°) sind es rund 1.5 % (horizontale Fläche) resp. 2.5 % (30° geneigt mit Südausrichtung). Ein konstanter Horizont von 10° entspricht einem Ort, der rundherum in 25 km Entfernung von 4'500 m hohen Bergen umgeben ist. Erst ein konstanter Horizont von 20° (Zenitwinkel 70°) führt zu einer Reduktion von rund 9 % resp. 12 %.



Abbildung 11: Oben: Kartenausschnitt (Quelle: map.geo.admin.ch) mit dem Beispielgebäude rot eingekreist. Mitte: Screenshot aus Google StreetView mit Blick Richtung Südwesten und auf das Gebäude. Unten: Hillshade des DOM mit der Beispieldachfläche rot umrandet.

5.2. Horizontberechnung für Fassadenflächen

Die Horizontberechnung für Fassadenflächen erfolgt im Wesentlichen analog zur Horizontberechnung für Dachflächen. Der Fernhorizont wird identisch wie bei den Dachflächen berechnet, da dieser ja nur einmal pro Gebäude berechnet wird. Der Referenzpunkt für den mittleren Horizont liegt auf halber Länge und halber Höhe der Fassadenfläche.

Die räumliche Auflösung für den Nahhorizont liegt bei 1 m horizontal und 1 m vertikal. Dabei werden die Höhenpunkte, zu denen das Gebäude gehört, ausgeblendet, womit auch der Verschattungseffekt von Vordächern auf die darunter liegenden Fassaden nicht berücksichtigt wird.

5.3. Interpolation Strahlungswerte

Die Strahlungsdaten von MeteoSchweiz liegen als netCDF-Dateien in einem Gitter mit 1.25 Gradminuten vor. Dies entspricht einer Gitterdistanz von ca. 1.6 km in West-Ost-Richtung und von ca. 2.3 km in Süd-Nord-Richtung. Die Strahlungsdaten sind aus Satellitenmessungen abgeleitet und umfassen die Parameter Globalstrahlung horizontal (W/m^2), Direktstrahlung horizontal (W/m^2), Diffusstrahlung horizontal (W/m^2) und Oberflächenalbedo (Wert zwischen 0 und 1). Die Koordinaten pro Pixel entsprechen dem Zentrum des Pixels, die angegebenen Strahlungswerte sind als Mittelwerte über das Pixel zu interpretieren (vgl. **Abbildung 12**). Mehr zur Methodik und zur Genauigkeit der Daten in [6] und [7].

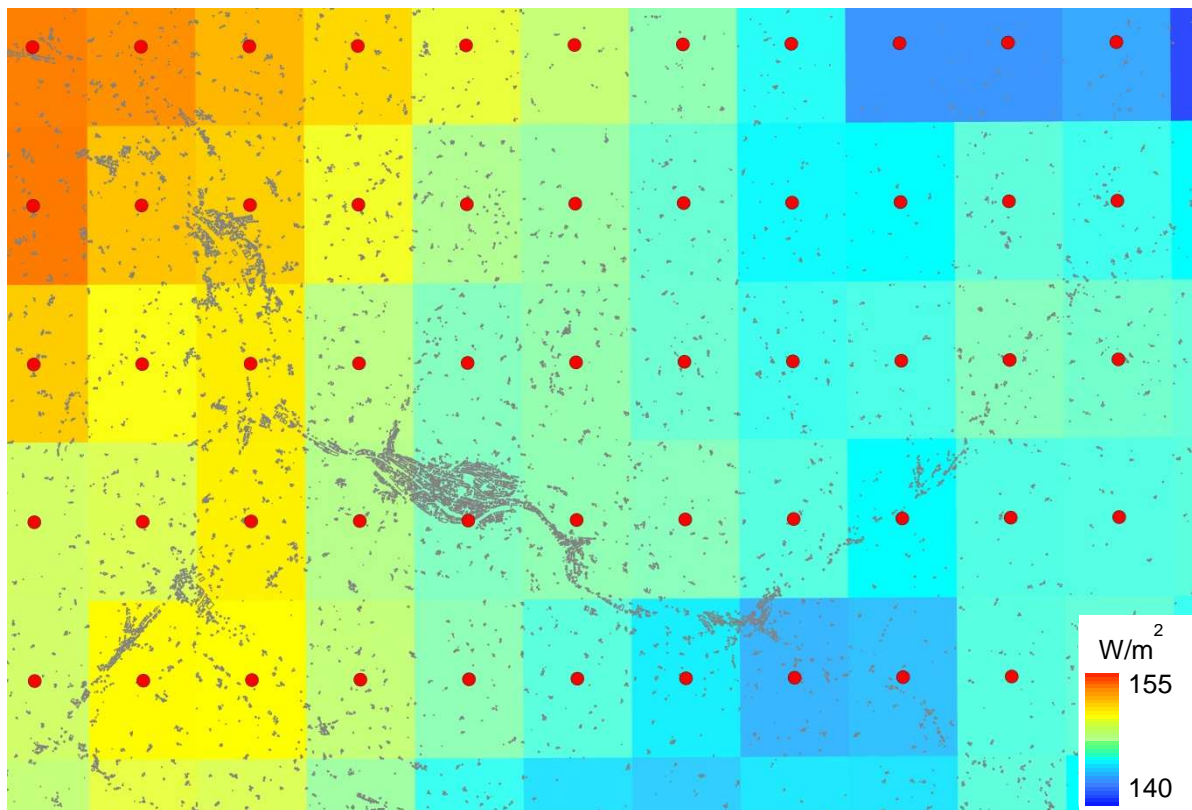


Abbildung 12: Beispiel für die Strahlungsdaten (Globalstrahlung horizontal) von MeteoSchweiz. Das Bild zeigt die Daten für den Juli 2014 für den Ausschnitt der Landeskarte 1168 (Langnau). Die roten Punkte markieren die Gitterpunkte, die im Zentrum des jeweiligen Pixels des Satellitenbildes liegen. Die Gebäude sind grau dargestellt.

Für das Projekt Sonnendach.ch stehen Stundenwerte für die Jahre 2004 – 2014 zur Verfügung. Daneben stehen für die Weiterverarbeitung auch die Sonnenwinkel (Sonnenhöhe und Sonnenazimut) als Stundenwerte zur Verfügung. Diese werden für die Umrechnung der Strahlung auf die geneigte Fläche und die Verschattungsanalyse verwendet.

Als Vorbereitung für die Strahlungsberechnung pro Dachfläche (vgl. Abschnitt 5.4) müssen die Strahlungsdaten für den Standort der Dachfläche interpoliert werden. Dazu werden für jede Stunde der Periode 2004 – 2014 (insgesamt 96'438 Stunden) und jeden Parameter die Werte für den Standort der Dachfläche aus den vier nächsten Nachbarn im Gitter linear interpoliert. Das Ergebnis der Interpolation für das Beispiel in **Abbildung 12** ist in **Abbildung 13** dargestellt.

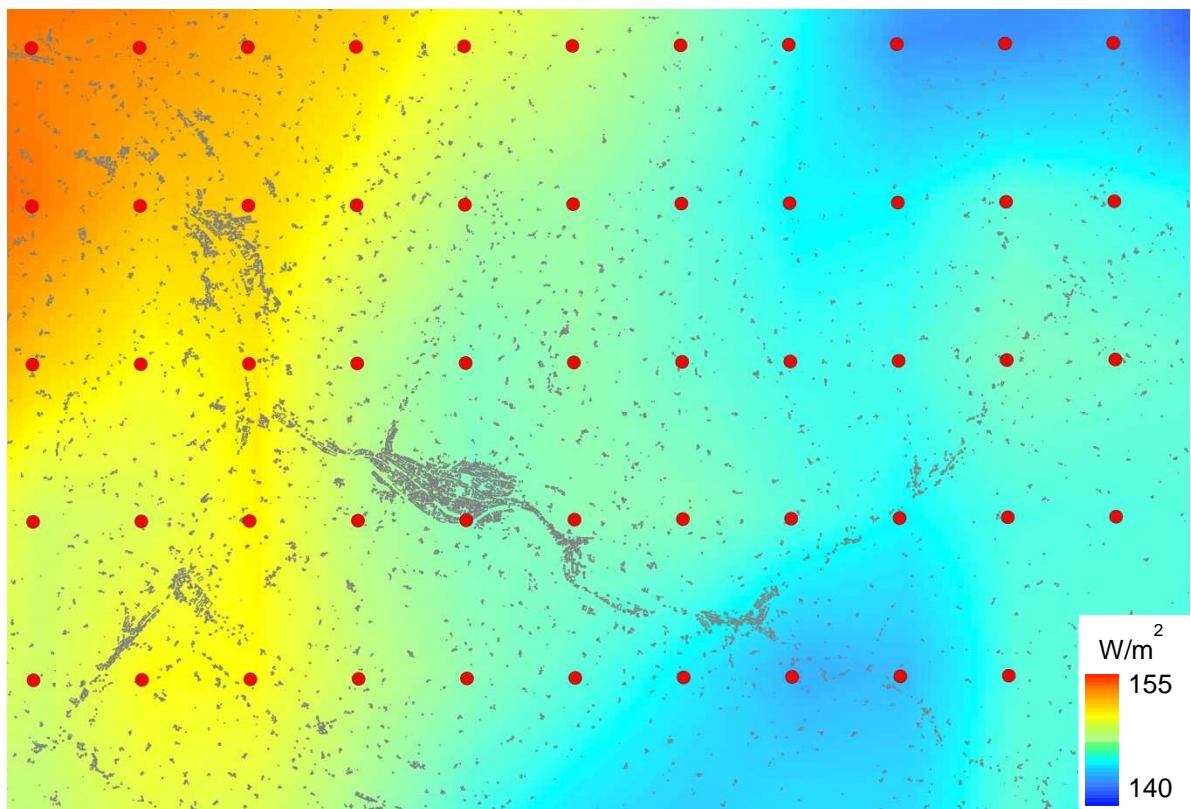


Abbildung 13: Beispiel für die Interpolation der Strahlungsdaten (Globalstrahlung horizontal). Das Bild zeigt die Daten für den Juli 2014 für den Ausschnitt der Landeskarte 1168 (Langnau). Die Roten Punkte markieren die Gitterpunkte, die im Zentrum des jeweiligen Pixels des Satellitenbildes liegen (vgl. **Abbildung 12**). Die Gebäude sind grau dargestellt.

5.4. Strahlungsberechnung geneigte Flächen mit Verschattung

Für die Umrechnung der Strahlung auf geneigte Flächen wird das anisotrope Perez-Modell [8] verwendet, welches unter den verfügbaren Modellen die höchste Genauigkeit aufweist. Es ist für die Schweiz mit einem hohen Anteil an Diffusstrahlung für eine genaue Strahlungsberechnung unabdingbar, ein anisotropes Strahlungsmodell wie das Perez-Modell zu verwenden. Das Perez-Modell wird auch standardmässig in der weltweit anerkannten Software Meteonorm (www.meteonorm.com) von Meteotest verwendet. Um die Recheneffizienz zu maximieren, wurde das Perez-Modell, so wie es in der Meteonorm implementiert ist, in der Programmiersprache Python nachgebildet. Für Details zum

Perez-Modell, wie es in der Meteonorm implementiert ist, verweisen wir auf das Theoriehandbuch der Meteonorm [9]. Hier werden die wichtigsten Punkte zusammengefasst.

Die Umrechnung auf geneigte Flächen erfolgt für jede Stunde im Zeitrahmen 2004 – 2014 separat. Die Strahlungsdaten von MeteoSchweiz liegen mit der Aufteilung der Globalstrahlung¹ in Direkt- und Diffusstrahlung vor. Die Globalstrahlung auf eine geneigte Fläche setzt sich aus drei Komponenten zusammen: der Direktstrahlung auf die geneigte Fläche, der Diffusstrahlung vom Himmel und der vom Boden reflektierten Strahlung.

Die Direktstrahlung auf die geneigte Fläche wird aus der Direktstrahlung auf die horizontale Ebene durch eine geometrische Umrechnung unter Berücksichtigung der Sonnenwinkel in der jeweiligen Stunde und der Neigung und Ausrichtung der Dachfläche ermittelt. Die Verschattung wird berücksichtigt, indem die resultierende Direktstrahlung auf die geneigte Fläche mit dem Wert in der Horizontmatrix an der Stelle, welche den Sonnenwinkeln in der jeweiligen Stunde entspricht, multipliziert wird.

Die Diffusstrahlung vom Himmel teilt sich wiederum in mehrere Komponenten auf (vgl. **Abbildung 14**): den isotropischen Teil, der über die ganze Himmelskugel konstant ist, den circumsolaren Teil (der Himmel ist um die Sonne herum heller) und den Horizontstreifen (horizon brightening; der Himmel ist über dem Horizont heller). Der isotropische Teil wird mit dem Sichtbarkeitsfaktor und einem für das Perez-Modell spezifischen Parameter multipliziert. Der Sichtbarkeitsfaktor gibt an, für welchen Teil der Halbkugel aus Sicht der geneigten Fläche der Himmel sichtbar ist. Der Sichtbarkeitsfaktor berechnet sich aus der Horizontmatrix durch numerische Integration. Der circumsolare Teil wird gleich behandelt wie die Direktstrahlung, der Horizontalstreifen wird unverändert belassen.

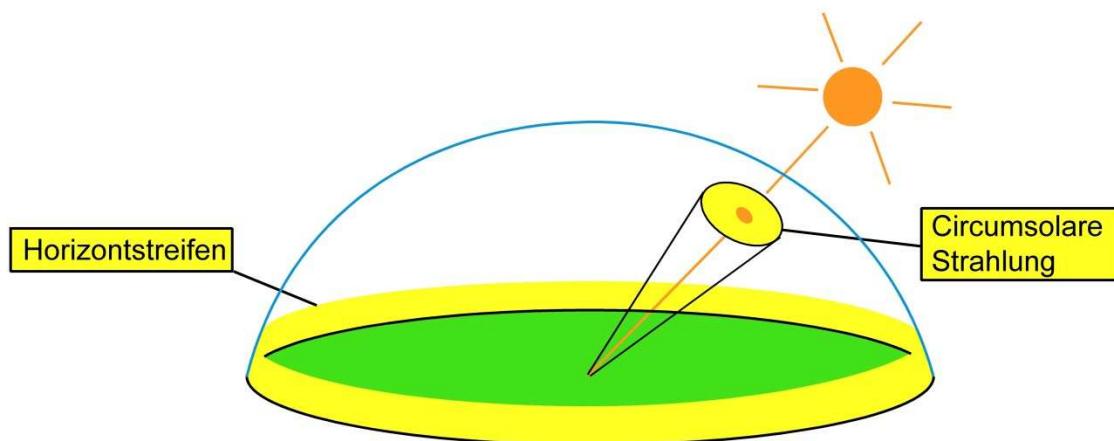


Abbildung 14: Illustration der Diffusstrahlung vom Himmel gemäss dem Perez-Modell.

Die reflektierte Strahlung berechnet sich aus der Globalstrahlung horizontal am entsprechenden Standort (unter Berücksichtigung des Horizontes) durch Multiplikation mit dem Albedofaktor (in den Daten von MeteoSchweiz enthalten) und durch Multiplikation mit $1 - \text{Sichtbarkeitsfaktor}$.

Die Strahlungsberechnung erfolgt stundenweise. Für die Angaben in Sonnendach.ch (Monats- und Jahreswerte) werden die Stundenwerte summiert und über die Jahre 2004 – 2014 gemittelt. Die be-

¹ Globalstrahlung: gesamte auf die Erdoberfläche treffende Sonnenstrahlung. Die Globalstrahlung teilt sich in Direkt- und Diffusstrahlung. Die Direktstrahlung beinhaltet alle Strahlung, welche direkt von der Sonne kommt. Die Diffusstrahlung beinhaltet das Licht vom Rest des Himmels sowie die reflektierte Strahlung.

rechnete Einstrahlung gibt die mittlere jährliche Einstrahlung (Globalstrahlung) pro Quadratmeter (Einheit kWh/m²/Jahr) unter Berücksichtigung der Verschattung an. Diese mittlere Einstrahlung pro Quadratmeter wird mit der Fläche der Dachfläche multipliziert, um die Gesamteinstrahlung auf die Dachfläche zu erhalten (Einheit kWh/Jahr).

5.5. Klassifizierung der Dachflächen

Für die Klassifizierung der Dachflächen sind verschiedene Methoden denkbar. So könnte z.B. für jede Dachfläche berechnet werden, wie hoch die Einstrahlung im Vergleich zur Globalstrahlung horizontal an diesem Standort ist. Die Klassifizierung wäre dann lokal maximal differenziert, ein Vergleich für Dachflächen an verschiedenen Standorten wäre so aber nicht möglich. Aus diesem Grund wurde in Absprache mit dem BFE entschieden, die Klassifizierung basierend auf der mittleren jährlichen Einstrahlung pro Quadratmeter (kWh/m²/Jahr) vorzunehmen. Der Vorteil dieser Klassifizierung liegt in der einfachen Verständlichkeit, der Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Standorten in der Schweiz und der direkten Verknüpfung mit dem Stromertrag pro Quadratmeter einer PV-Anlage. Die verwendeten Klassen sind in **Tabelle 2** dargestellt.

| Code | Beschreibung/Wert | Abhängigkeit zu mittlerer jährlicher Einstrahlung |
|------|-------------------|---|
| 1 | gering | < 800 kWh / m ² / Jahr |
| 2 | mittel | ≥ 800 und < 1000 kWh / m ² / Jahr |
| 3 | gut | ≥ 1000 und < 1200 kWh / m ² / Jahr |
| 4 | sehr gut | ≥ 1200 und < 1400 kWh / m ² / Jahr |
| 5 | hervorragend | ≥ 1400 kWh / m ² / Jahr |

Tabelle 2: Übersicht über die Klassifizierung der Dachflächen.

5.6. Klassifizierung der Fassadenflächen

Die Klassifizierung der Fassadenflächen erfolgt analog zur Klassifizierung der Dachflächen, die Klassengrenzen sind aber gegenüber den Dachflächen angepasst, um eine bessere Differenzierung zu erreichen, da die Fassaden im Mittel eine tiefere Einstrahlung aufweisen. Die verwendeten Klassen sind in **Tabelle 3** dargestellt.

| Code | Beschreibung/Wert | Abhängigkeit zu mittlerer jährlicher Einstrahlung |
|------|-------------------|---|
| 1 | gering | < 600 kWh / m ² / Jahr |
| 2 | mittel | ≥ 600 und < 800 kWh / m ² / Jahr |
| 3 | gut | ≥ 800 und < 1000 kWh / m ² / Jahr |
| 4 | sehr gut | ≥ 1000 und < 1200 kWh / m ² / Jahr |
| 5 | hervorragend | ≥ 1200 kWh / m ² / Jahr |

Tabelle 3: Übersicht über die Klassifizierung der Fassaden.

5.7. Parameter zur Berechnung von aktuellen Monatswerten

Die Umrechnung der Globalstrahlung horizontal (GH) auf die Globalstrahlung auf die geneigte Dachfläche (GK) wird für aktuelle Monatswerte mit einer Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) auf Monatsbasis pro Dachfläche angenähert, wobei DIR die monatliche Direktstrahlung und DIF die monatliche Diffusstrahlung auf die horizontale Ebene am entsprechenden Standort sind. Diese Näherung erlaubt es, aus aktuellen monatlichen Strahlungsdaten auf die horizontale Ebene die Strahlung auf die geneigte Fläche näherungsweise und mit geringem Aufwand zu berechnen.

Im Rahmen der Strahlungsberechnung werden für jede Dachfläche die Monatswerte für GK für die Periode 2004 – 2014 mit dem Perez-Modell berechnet. Für jeden Kalendermonat liegen somit 11 Wertepaare vor für GK als Funktion von DIR und DIF. Aus diesen 11 Wertepaaren werden für die Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) die Parameter a, b und c durch lineare Regression (least squares) ermittelt.

Die Bestimmung der Parameter a, b und c durch lineare Regression entspricht geometrisch gesprochen der Interpolation einer Ebene, so dass die 11 Wertepaare von GK als Funktion von DIR und DIF möglichst nahe bei der Ebene liegen. In **Abbildung 15** sind die 11 Wertepaare für ein Beispiel (Januar, nach Süden ausgerichtete und 30° geneigte Fläche) dargestellt und in **Abbildung 16** die durch lineare Regression ermittelte Ebene.

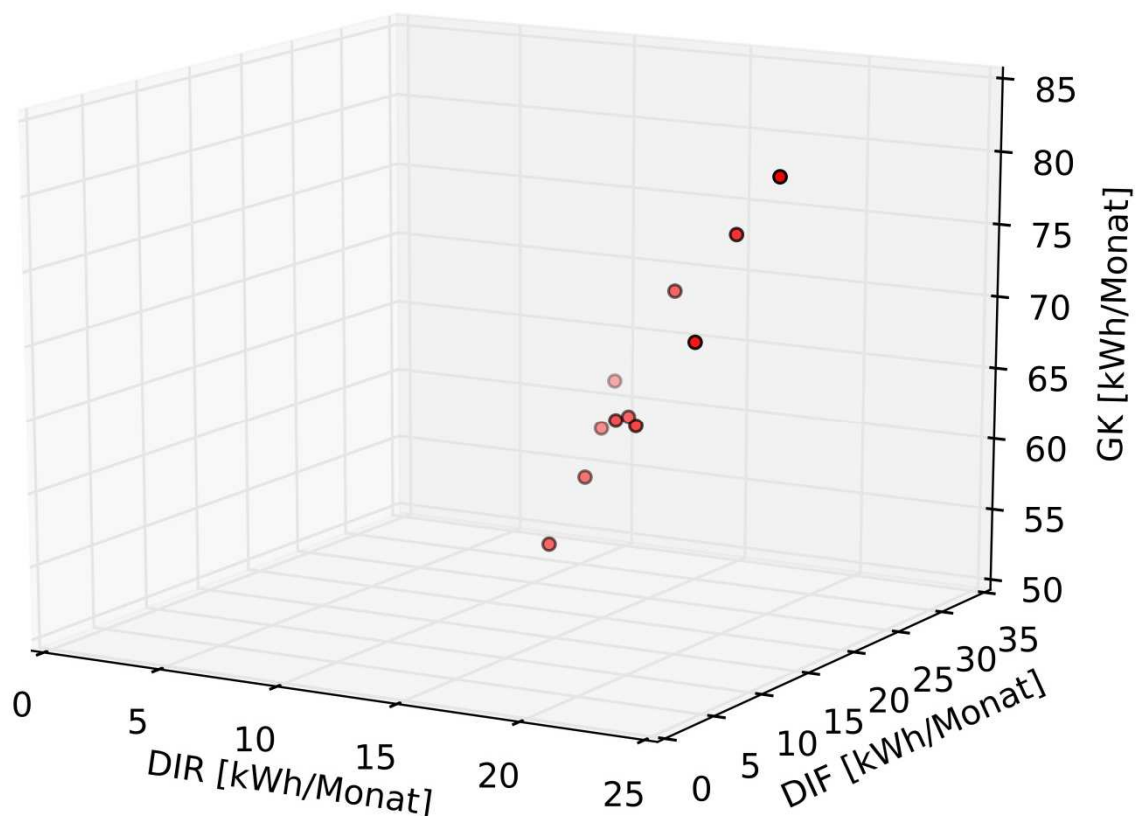


Abbildung 15: Beispiel für die Monatswerte Januar der Globalstrahlung (GK, in kWh/Monat) auf eine 30° geneigte und nach Süden ausgerichtete Fläche als Funktion der Direktstrahlung (DIR) und der Diffusstrahlung (DIF) auf die horizontale Ebene für die Jahre 2004 – 2014 am Standort Zollikofen.

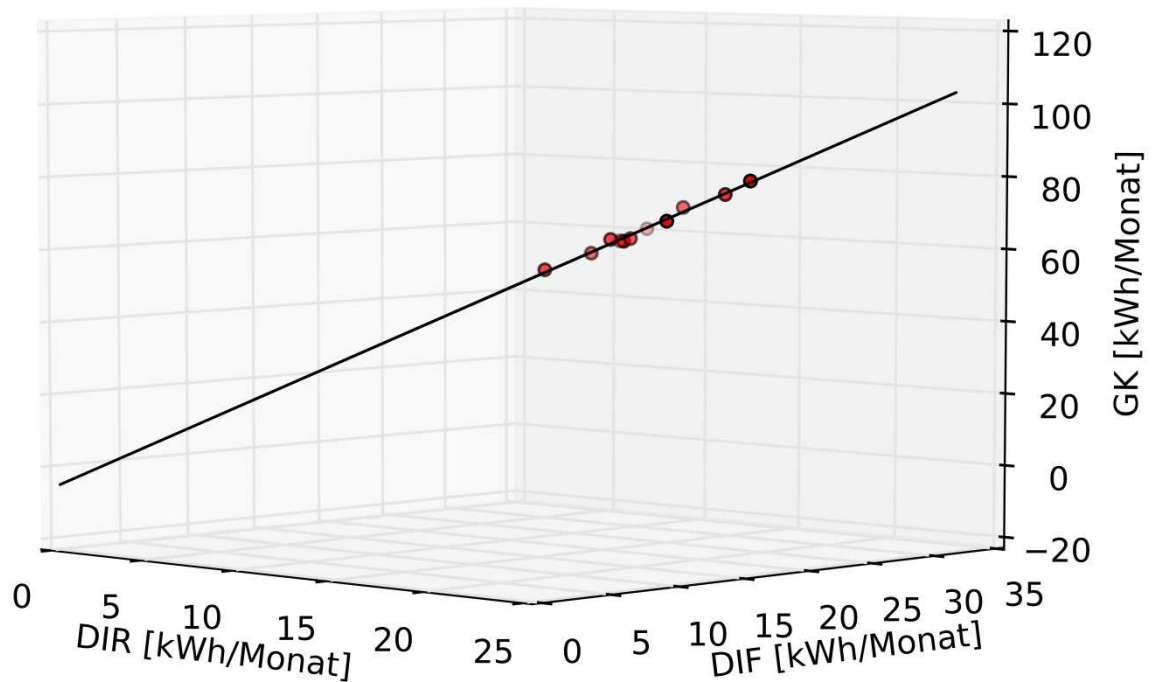


Abbildung 16: Gleiches Beispiel wie in **Abbildung 15** mit der durch lineare Regression ermittelten Ebene, welche der Funktion $(a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c)$ entspricht. Hier ist $a=2.62$, $b=1.33$, $c=-4.92$.

Auf den ersten Blick würde man erwarten, der Parameter c sollte (nahe bei) Null sein, weil, wenn DIR und DIF Null sind, muss auch GK Null sein. Auf den zweiten Blick aber zeigt sich, dass DIR, DIF und GK in der Regel weit weg vom Koordinatenursprung sind und die lineare Regression für diesen Wertebereich von DIR und DIF bestimmt wird. Diese lineare Regression lässt sich nicht einfach so auf andere Wertebereiche von DIR und DIF übertragen.. Es wäre deshalb überraschend, wenn die interpolierte Ebene immer durch den Koordinatenursprung (entspricht $c=0$) gehen würde.



6. Berechnung Ertrag Photovoltaik

Der elektrische Ertrag (Stromertrag) einer Photovoltaikanlage hängt nicht nur von der Fläche und der Einstrahlung ab, sondern auch vom Wirkungsgrad der eingesetzten Module und von weiteren Faktoren, die in der sogenannten Performance Ratio zusammengefasst werden können. Während die Fläche und die Einstrahlung in Sonnendach.ch berechnet werden, müssen für den Modulwirkungsgrad und für die Performance Ratio Annahmen getroffen werden.

Der für Module angegebene Wirkungsgrad bezieht sich immer auf Standard-Testbedingungen (25°C Zelltemperatur und Einstrahlungsstärke von 1'000 W/m²). Bei heute kommerziell erhältlichen Modulen liegen die Wirkungsgrade je nach Modultyp zwischen 10 % und 22 %. Hier spezifische Werte für die verschiedenen Modultypen anzugeben ist aufgrund der Vielfalt der Produkte und der laufenden Verbesserungen nicht sinnvoll. Für Sonnendach.ch wird in Absprache mit dem BFE ein Modulwirkungsgrad von 17 % verwendet.

Neben dem Modulwirkungsgrad muss weiter die Performance Ratio (auch Systemwirkungsgrad genannt) berücksichtigt werden. Die Performance Ratio ist das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Stromertrag (AC-Einspeisung) und einem theoretisch erreichbaren Ertrag, wenn die PV-Anlage insgesamt immer mit dem Modulwirkungsgrad die Einstrahlung in Strom umwandeln würde.

Es gibt diverse Faktoren, die dazu führen, dass die Performance Ratio kleiner ist als das theoretische Maximum von 1. Zum einen wird das Modul meist nicht bei Standard-Testbedingungen betrieben, sondern bei einer höheren Temperatur. Der Wirkungsgrad vieler Module ist aber temperaturabhängig und nimmt z.B. für Siliziummodule mit steigender Temperatur ab. Die Modultemperatur wiederum hängt wesentlich von der Art der Anlage ab. So ist diese bei einer dachintegrierten Anlage in der Regel höher als bei einer Aufdachanlage (aufgrund geringerer Kühlung).

Neben der Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades fließen weitere Verluste in der Anlage (z.B. Wechselrichterverluste, Leitungsverluste, Verschmutzung, Schnee auf der Anlage, etc.) in die Performance Ratio mit ein. Alle diese Effekte lassen sich theoretisch modellieren. Weil aber auch für diese Modellierungen Annahmen getroffen werden müssten (z.B. Modultyp für die Temperaturabhängigkeit, Aufdach- oder dachintegrierte Anlage, Wechselrichtertyp, etc.), wurde in Absprache mit dem BFE entschieden, auf eine detaillierte Modellierung des Stromertrages zu verzichten und stattdessen einen fixen Wert für die Performance Ratio von 0.8 zu verwenden.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass die Ergebnisse sehr leicht nachvollziehbar sind. Der Stromertrag ergibt sich durch Multiplikation der Gesamteinstrahlung auf eine Dachfläche mit dem Modulwirkungsgrad von 0.17 (17 %) und der Performance Ratio von 0.8 (80 %). Insgesamt gilt also $\text{Stromertrag} = \text{Gesamteinstrahlung} \times 0.136$.

Wird für eine konkrete Anlage ein anderes Modul verwendet oder muss aufgrund der Spezifikation der Anlage von einer anderen Performance Ratio ausgegangen werden, so lassen sich die Ergebnisse aus Sonnendach.ch leicht auf den konkreten Fall anpassen.

Die Leistung von Photovoltaikanlagen wird in der Regel in Kilowattpeak [kWp] angegeben. Dabei handelt es sich um die Leistung der Anlage bei Standard-Testbedingungen. Die pro Quadratmeter installierbare Leistung in [kWp] ergibt sich aus dem Modulwirkungsgrad. Bei einem Modulwirkungsgrad von 17 % liegt die Leistung pro Quadratmeter bei Standardbedingungen bei 0.17 kWp/m². Für eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1 kWp wird somit eine Fläche von rund 6 m² benötigt.

7. Berechnung Ertrag Solarthermie

Im Gegensatz zur Photovoltaik, bei der die Produktion einer PV-Anlage unabhängig ist vom Bedarf, besteht bei Solarthermieranlagen eine erhebliche Abhängigkeit des Wirkungsgrades einer Anlage von deren Dimensionierung im Vergleich zum Bedarf im entsprechenden Gebäude. Für Sonnendach.ch wurde deshalb versucht, den Wärmebedarf eines Gebäudes aus statistischen Daten abzuschätzen (vgl. Abschnitt 7.4), um die Solarthermieranlage anschliessend diesem geschätzten Verbrauch angepasst zu dimensionieren (vgl. Abschnitt 7.5). Für die so dimensionierte Solarthermieranlage wird anschliessend der Ertrag berechnet (vgl. Abschnitt 7.6) und es werden daraus weitere Parameter abgeleitet (vgl. Abschnitt 7.7).

Für die Abschätzung des Wärmebedarfs werden einerseits Temperaturwerte am Standort des Gebäudes benötigt (vgl. Abschnitte 7.1 und 7.2) und andererseits statistische Daten, mit Hilfe derer das Alter und die Nutzung des Gebäudes ermittelt werden kann (vgl. Abschnitt 7.3).

7.1. Interpolation Temperaturwerte

Für das Projekt Sonnendach.ch stehen die Tagesmittelwerte, Tagesmaxima und Tagesminima der Temperatur für die Periode 2004 – 2014 zur Verfügung. Die Daten basieren auf den Messdaten des SwissMetNet, woraus MeteoSchweiz ein 2-km-Gitter generiert. Mehr zur Methodik der Interpolation und zur Genauigkeit der Daten in [10].

Eine lineare Interpolation der Temperaturwerte am Standort des Gebäudes aus den Gitterdaten analog den Strahlungsdaten (vgl. Abschnitt 5.3) ist nicht sachgerecht, da die Temperaturwerte mit der Höhe stark variieren. Bei der komplexen Topographie in der Schweiz können 1-2 Kilometer horizontale Distanz bereits einen beträchtlichen Höhenunterschied bedeuten. Aus diesem Grund wird für die Interpolation der Temperaturwerte am Standort des Gebäudes für jeden Tag für die 9 nächsten Nachbargitterpunkte eine lineare Regression der Funktion Temperatur/Höhe bestimmt. Die Temperaturwerte für den Standort des Gebäudes werden dann in Abhängigkeit der Standorthöhe aus dieser linearen Regression berechnet. Falls die 9 nächsten Nachbarn alle innerhalb von 100 Höhenmetern liegen, werden die 16 nächsten Nachbarn für die lineare Regression verwendet.

7.2. Heizgradtage

Die Heizgradtage werden verwendet, um den jährlichen Heizwärmebedarf auf die Kalendermonate zu verteilen (vgl. Abschnitt 7.4). Zudem sind die Heizgradtage ein in der Praxis oft verwendeter Parameter, der über Sonnendach.ch pro Gebäude zur Verfügung steht. Die Heizgradtage für einen Monat berechnen sich aus der Differenz zwischen der Raumtemperatur und der Tagesmitteltemperatur an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur tiefer als die Heizgrenze. Es werden die in der Schweiz gängigen Werte von 20°C für die Raumtemperatur und 12°C für die Heizgrenze verwendet.

Die Heizgradtage werden für jeden Monat in der Periode 2004 – 2014 berechnet und daraus wird ein Mittelwert für jeden Kalendermonat über die 11 Jahre gebildet und in der weiteren Berechnung verwendet. Da es für fast jeden Kalendermonat auch im Mittelland irgendwann in den 11 Jahren einen Tag gibt, mit einer Tagesmitteltemperatur < 12°C, sind entsprechend auch die Heizgradtagwerte für fast jeden Monat grösser als Null. Dies auch in Monaten, in denen normalerweise nicht geheizt wird. Da die Werte aber sehr gering sind, fallen sie bei der Berechnung nicht ins Gewicht.



7.3. Zuordnung GWR zu swissBUILDINGS^{3D} 2.0

Die zentrale Datengrundlage für die Abschätzung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs ist das Eidgenössische Gebäude- und Wohnungsregister (GWR). Für detaillierte Informationen zum GWR verweisen wir auf [5]. Für die Abschätzung des Wärmebedarfs in Sonnendach.ch werden aus dem Gebäuderegister insbesondere die Attribute Bauperiode, Gebäudekategorie (z.B. Wohngebäude ohne Nebennutzung, Wohngebäude mit Nebennutzung) und die Gebäudeklasse (z.B. Gebäude mit einer Wohnung, Bürogebäude, Industriegebäude) verwendet. Aus dem Wohnungsregister fließt die Wohnungsfläche in die Abschätzung mit ein. Es sind nicht alle Attribute für alle Objekte verfügbar, weshalb in einigen Fällen fehlende Informationen mit Durchschnittswerten ergänzt oder aus den GIS-Daten abgeleitet werden müssen.

Für die Abschätzung des Wärmebedarfs pro Gebäude im swissBUILDINGS^{3D} 2.0 müssen diese Gebäude mit den GWR-Datenpunkten verknüpft werden. Diese Zuordnung ist nicht uneindeutig, sondern es handelt sich im Allgemeinen um eine sogenannte m zu n Beziehung: Ein Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 kann keinem, einem oder mehreren Datenpunkten im GWR entsprechen. Umgekehrt kann ein Datenpunkt im GWR zu einem oder mehreren Gebäuden im swissBUILDINGS^{3D} 2.0 gehören.

Da keine Zuordnung zwischen GWR und swissBUILDINGS^{3D} 2.0 über Attribute möglich ist, muss die Zuordnung über die Geometrie erfolgen. Die Gebäudedatensätze im GWR verfügen über ein Attribut Koordinaten. Gemäss Merkmalskatalog des GWR gilt für diese Koordinaten: "Als geographischer Referenzpunkt gilt im Prinzip die Grundrissmitte des Gebäudes. Bei besonderen Formen (Winkel, U-Form u.dgl.) wird jedoch darauf geachtet, dass der Referenzpunkt in jedem Fall innerhalb der Grundrissfläche liegt." Es hat sich gezeigt, dass diese Anforderung im Merkmalskatalog des GWR nicht immer erfüllt ist. Trotzdem erfolgt die Zuordnung zwischen GWR und swissBUILDINGS^{3D} 2.0 mangels Alternativen über die Koordinaten.

Es kann eine ganze Reihe von unterschiedlichen Situationen auftreten (vgl. **Abbildung 17**):

- zwei (oder mehrere) GWR-Datenpunkte innerhalb eines Gebäudes im swissBUILDINGS^{3D} 2.0
- ein GWR-Datenpunkt liegt innerhalb mehrerer Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0, die sich aber überlappen
- ein GWR-Datenpunkt liegt nicht innerhalb, aber sehr nahe von einem Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0
- ein GWR-Datenpunkt kann keinem Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 zugeordnet werden
- einem Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 kann kein GWR-Datenpunkt zugeordnet werden

Dass kein GWR-Datenpunkt für ein Gebäude vorhanden ist, kann verschiedene Ursachen haben. Entweder wurde das Gebäude erst kürzlich erbaut und ist im GWR noch nicht erfasst. Oder es handelt sich um ein Gebäude (z.B. kleiner Stall, Garage, etc.), das im GWR nicht erfasst wird. Es kann sich auch um eine Datenlücke im GWR handeln. Wenn ein GWR-Datenpunkt keinem Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 zugeordnet werden kann, sind vermutlich die angegebenen Koordinaten nicht korrekt.

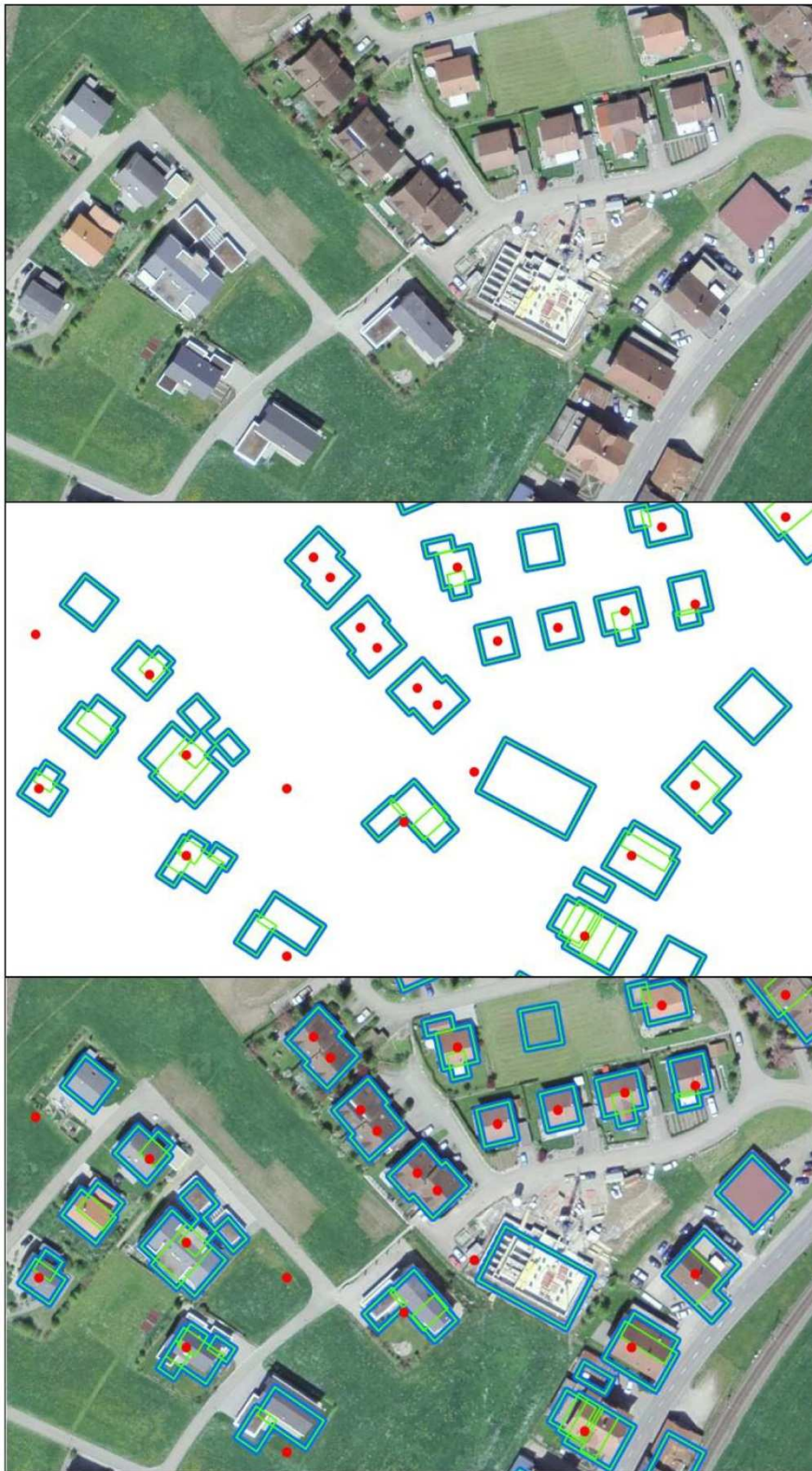


Abbildung 17: Grundrisse aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (grün), verschmolzene (dissolved) Grundrisse aus swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (blau) und GWR-Datenpunkten (rot). Quelle Luftbild: map.geo.admin.ch.



Die Zuordnung der GWR-Datenpunkte zu den Gebäuden in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 erfolgt in zwei Schritten:

1. Zuordnung der GWR-Datenpunkte zu den verschmolzenen Grundrissen des swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (SB_dissolved).
2. Zuordnung zu den Grundrissen innerhalb der verschmolzenen Grundrisse, falls mehrere GWR-Datenpunkte innerhalb eines verschmolzenen Grundrisses (SB_dissolved) liegen.

Für den ersten Schritt können drei Fälle auftreten:

- a. **1 (SB_dissolved) : 1 (GWR)** => Alle Grundrisse innerhalb des verschmolzenen Grundrisses erhalten diesen GWR-Datenpunkt zugeordnet.
- b. **1 (SB_dissolved) : 0 (GWR)** => Nächstgelegenen GWR-Datenpunkt zuordnen, falls dieser weniger als 10 m entfernt liegt und dieser GWR-Datenpunkt nicht für ein anderes Gebäude der nächstgelegene GWR-Datenpunkt ist. Falls eine Zuordnung erfolgt, erhalten alle Grundrisse innerhalb des verschmolzenen Grundrisses diesen GWR-Datenpunkt zugeordnet.
- c. **1 (SB_dissolved) : n (GWR)** => Zuordnung innerhalb des verschmolzenen Grundrisses vornehmen (zweiter Schritt).

Für den zweiten Schritt werden jedem Grundriss diejenigen GWR-Datenpunkte zugeordnet, welche innerhalb des Grundrisses liegen. Liegt kein GWR-Datenpunkt innerhalb des Grundrisses, so wird der nächstgelegene GWR-Datenpunkt zugeordnet, der innerhalb des verschmolzenen Grundrisses liegt.

Das Ergebnis für das Beispielgebiet in **Abbildung 17** ist in **Abbildung 18** dargestellt. Das Ergebnis für ein etwas komplexeres Gebiet in **Abbildung 19**.

Das Fazit zur Zuordnung der GWR-Datenpunkte sieht wie folgt aus:

- Die Zuordnung von GWR und swissBUILDINGS^{3D} 2.0 ist möglich und in vielen Fällen eindeutig.
- Im Schnitt können für das bis jetzt bearbeitete Gebiet (knapp 45 % der Gebäude in der Schweiz) rund 95 % der GWR-Datenpunkte einem Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 zugeordnet werden.
- Im Schnitt kann bei rund 80 % der Gebäude in swissBUILDINGS^{3D} 2.0 mindestens ein GWR-Datenpunkt zugeordnet werden. Wenn einem Gebäude kein GWR-Datenpunkt zugeordnet werden kann, besteht auch keine Möglichkeit, den Wärmebedarf abzuschätzen. Die Berechnung für die Solarthermienutzung wird dann nicht durchgeführt.
- Es gibt eine Unsicherheit bei der Zuordnung. Diese fließt als Unsicherheit in die Berechnung des Solarthermieertrages ein.

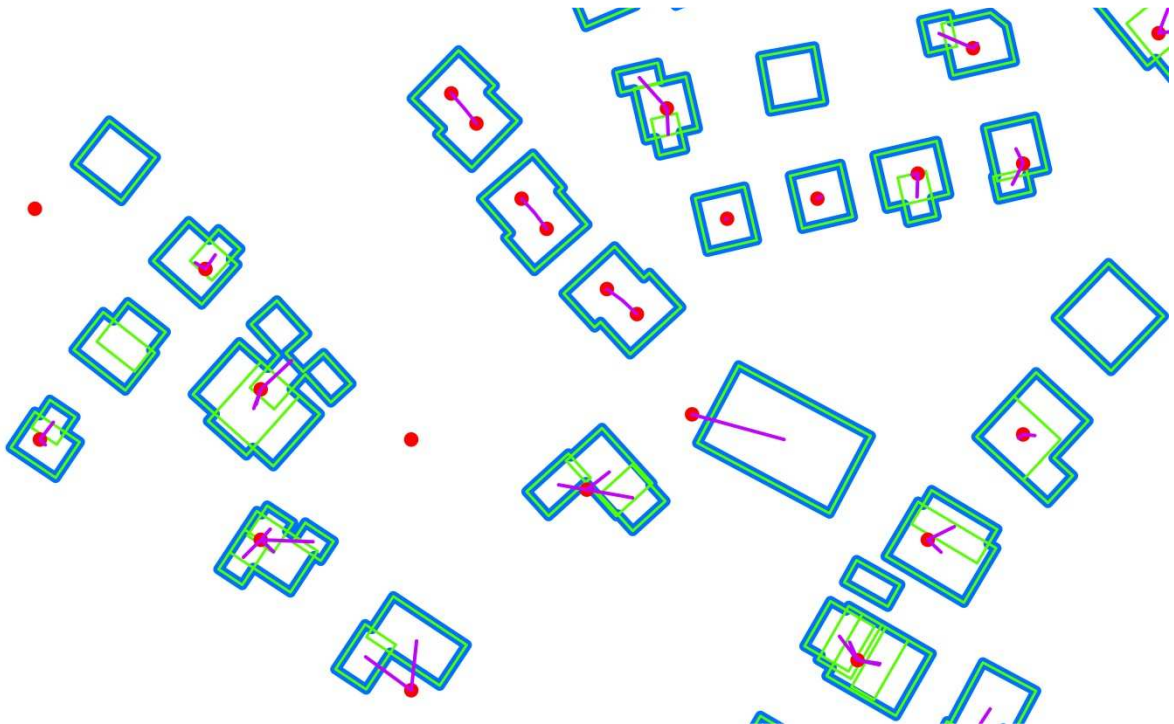


Abbildung 18: Ergebnis der Zuordnung für das Beispielgebiet in **Abbildung 17**. GWR (rote Punkte), Grundrisse swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (grüne Linien), verschmolzenen Grundrisse (blaue Linien). Die violetten Linien zeigen die Verbindung des GWR-Datenpunktes mit dem Mittelpunkt des Gebäudes, dem dieser zugeordnet wurde.

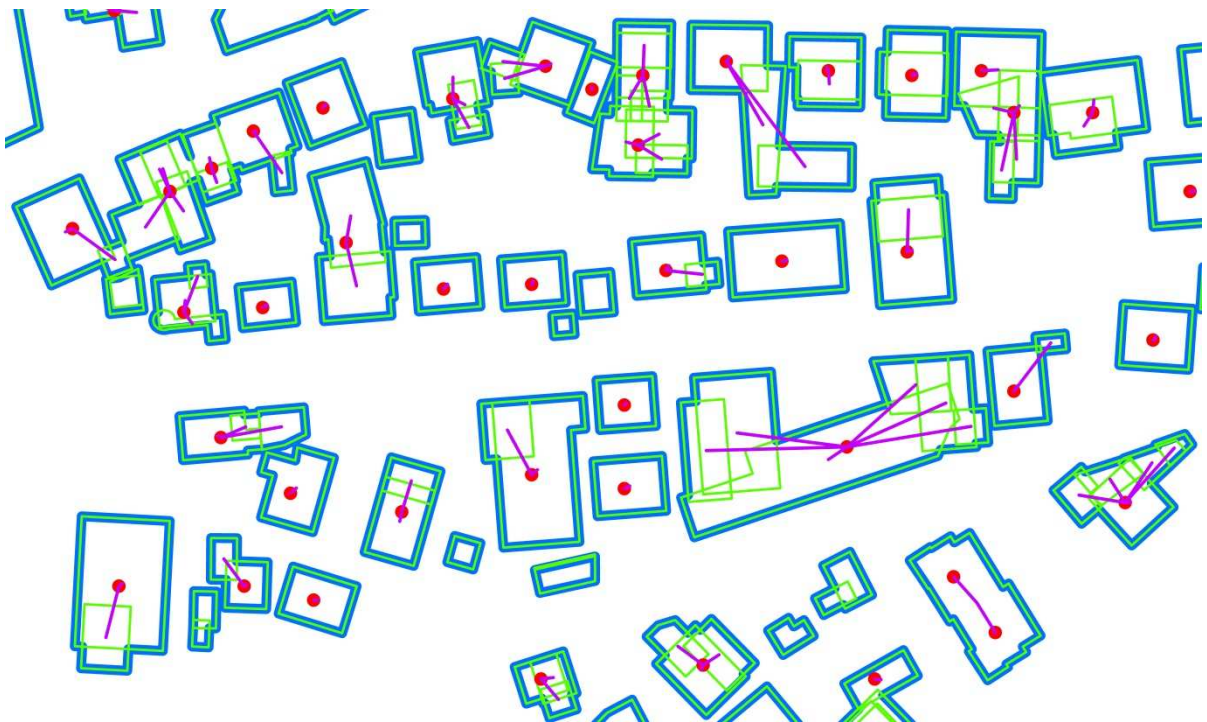


Abbildung 19: Ergebnis der Zuordnung für ein weiteres, etwas komplexeres Beispielgebiet. GWR (rote Punkte), Grundrisse swissBUILDINGS^{3D} 2.0 (grüne Linien), verschmolzene Grundrisse (blaue Linien). Die violetten Linien zeigen die Verbindung des GWR-Datenpunktes mit dem Mittelpunkt des Gebäudes, dem dieser zugeordnet wurde.

7.4. Abschätzung Wärmebedarf

Die Abschätzung des Wärmebedarfs erfolgt separat für den Heizwärmebedarf und den Warmwasserbedarf und ist ausführlich in Beilage 1, "Solarkataster Schweiz², Abschätzung des Wärme- und Brauchwarmwasserbedarfs" erläutert. Die entsprechende Methodik wurde durch Sandra Stettler von der EGON AG entwickelt. An dieser Stelle geben wir eine kurze Zusammenfassung der Methodik wieder.

Aus den GWR-Daten wird im Wesentlichen ermittelt, wie alt ein Gebäude ist und wie es genutzt wird. Mit Hilfe von typischen Werten gemäss SIA Merkblatt 2024 wird darauf aufbauend der Wärmebedarf abgeschätzt.

Für den Brauchwarmwasserbedarf ist die Abschätzung schematisch in **Abbildung 20** dargestellt. Zuerst wird die Energiebezugsfläche abgeschätzt und dann mit den für die jeweilige Gebäudeklasse spezifischen Werten pro Energiebezugsfläche aus SIA 2024 der Bedarf ermittelt. Schliesslich werden die Verluste in der Warmwasserversorgung nach SIA 385/2 berücksichtigt.

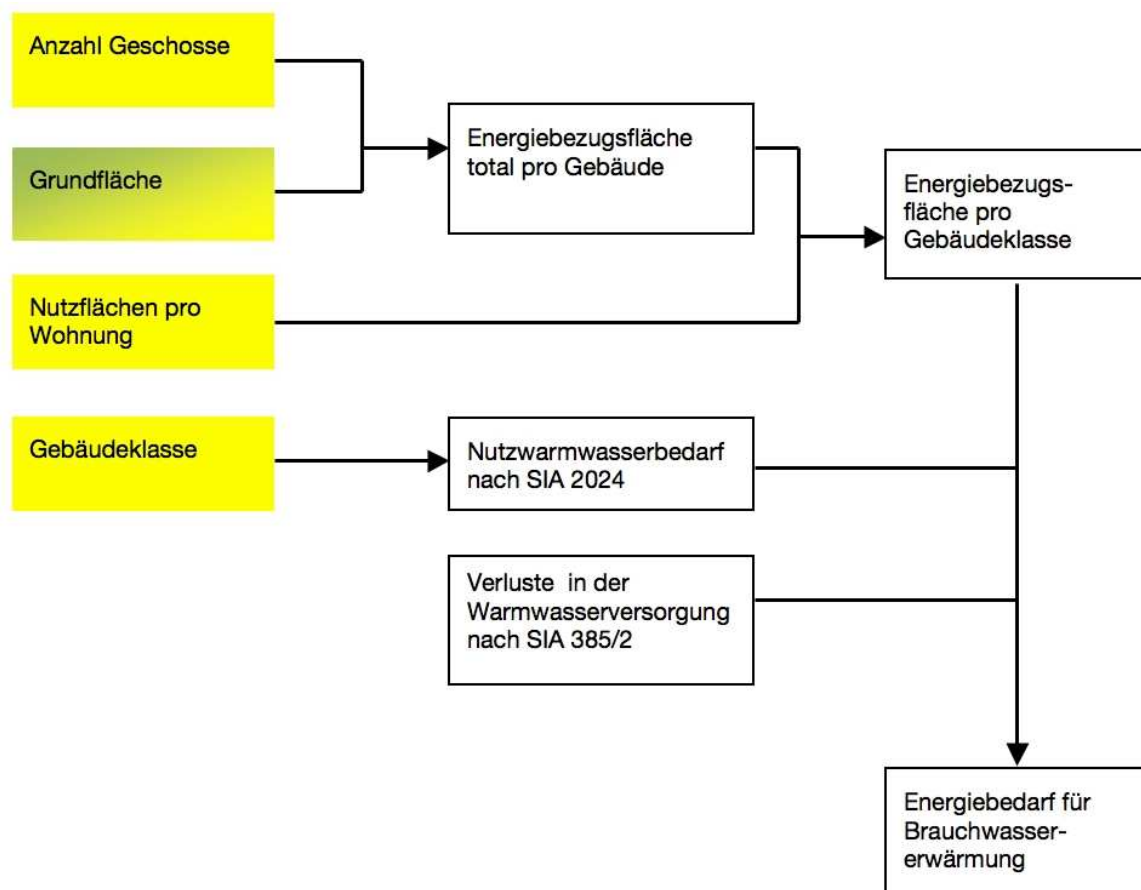


Abbildung 20: Schema zur Herleitung des Energiebedarfs für Brauchwarmwassererwärmung. Legende: Gelb: Daten aus dem GWR. Grün: Bei fehlenden Daten aus GIS-Daten ermittelt.

² Bis die URL für die Publikation bekannt war, lief das Projekt Sonnendach.ch unter der Bezeichnung "Solarkataster Schweiz". Da diese Beilage in einem früheren Projektstadium erstellt wurde, wird darin noch die Bezeichnung "Solarkataster Schweiz" anstelle von Sonnendach.ch verwendet.

Für den Heizwärmebedarf erfolgt die Abschätzung der Energiebezugsfläche analog (vgl. **Abbildung 21**), woraus wiederum mit für die entsprechende Gebäudeklasse spezifischen Werten pro Energiebezugsfläche aus SIA 2024 der Heizbedarf pro Gebäude abgeschätzt wird. Da es sich bei den Werten aus SIA 2024 um Mittelwerte für den aktuellen Gebäudebestand handelt, erfolgt eine entsprechende Korrektur basierend auf der Bauperiode gemäss GWR. Der resultierende Wert wird aufgrund der Jahresmitteltemperatur am Standort im Vergleich zu 8.5°C, welches die Referenztemperatur in SIA 2024 ist, angepasst und es wird schliesslich ein Wirkungsgrad von 0.85 des Heizsystems miteinbezogen.

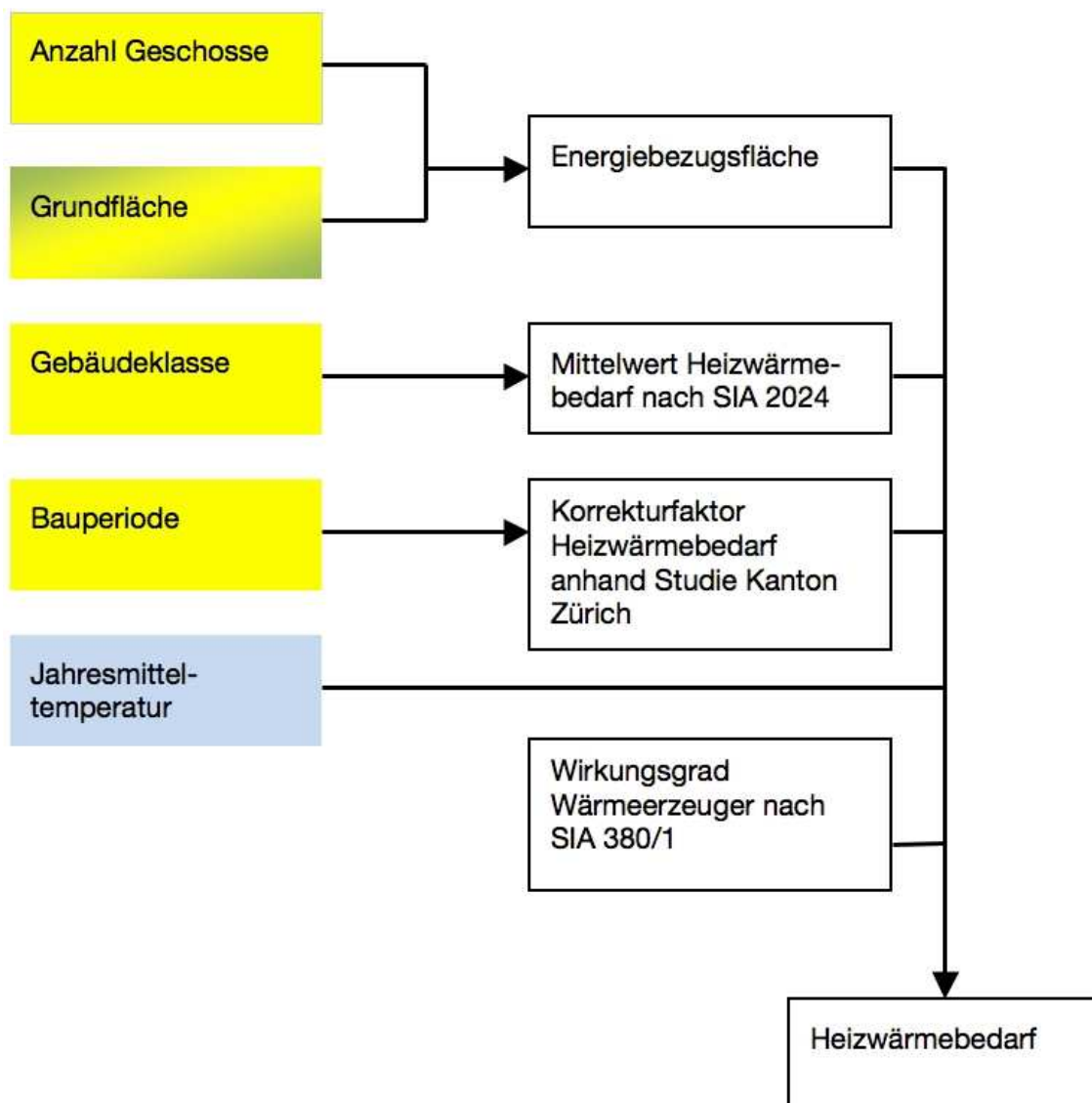


Abbildung 21: Schema zur Herleitung des Heizwärmebedarfs. Legende: Gelb: Daten aus dem GWR. Grün: Bei fehlenden Daten aus GIS-Daten ermittelt. Blau: Klimadaten.

Wir sprechen in diesem Abschnitt bewusst von Abschätzung des Wärmebedarfs, da es sich bei den Datengrundlagen um statistische Werte (durchschnittliche Werte) für Gebäude mit einem bestimmten Alter und einer bestimmten Nutzung handelt. Das einzelne Gebäude kann erheblich von diesem Durchschnitt abweichen, z.B. weil ein älteres Gebäude saniert wurde (was nichts an der Bauperiode



ändert) oder weil für eine spezifische Nutzung der Bedarf sehr unterschiedlich sein kann (z.B. für Industriegebäude). Zudem besteht bei der Zuordnung der GWR-Daten zu den swissBUILDINGS-Daten eine Unsicherheit.

7.5. Dimensionierung Solarthermieanlage

Die Dimensionierung der Solarthermieanlage auf einer Dachfläche erfolgt basierend auf dem in Abschnitt 7.4 für das Gebäude, zu dem die Dachfläche gehört, abgeschätzten Wärmebedarf. Dabei wird für jede Dachfläche davon ausgegangen, dass für das zugehörige Gebäude nur auf dieser Dachfläche eine Solarthermieanlage realisiert wird. Die pro Dachfläche angegebenen Solarthermieerträge lassen sich somit nicht einfach für alle Dachflächen eines Gebäudes zusammenzählen, wie das bei der Photovoltaik der Fall ist. Diesem Umstand ist insbesondere bei Potentialstudien Rechnung zu tragen.

Die Dimensionierung der Solarthermieanlage ist in der Beilage "Solarkataster Schweiz"³: Abschätzung der Solarthermie-Potentiale" im Detail beschrieben und entspricht einer typischen Dimensionierung in der Praxis. Als Basiswert wird bis 20 Personen bei einer Einstrahlung von 1000 kWh/m²/Jahr eine Kollektorfläche von 1.2 m² pro Person verwendet. Die Anzahl Personen wird aus dem Warmwasserbedarf abgeleitet. Bei mehr als 20 Personen reduziert sich die Kollektorfläche pro Person. Zusätzliche Kollektorfläche wird für den Heizbedarf hinzugezählt. Die resultierende Kollektorfläche wird aufgrund der Einstrahlung auf die Dachfläche angepasst. Ist die Kollektorfläche gemäss Dimensionierung grösser als die Dachfläche, wird die Kollektorfläche auf die Fläche der Dachfläche verkleinert.

Das Speichervolumen berechnet sich aus der Kollektorfläche, wobei unabhängig von der Kollektorfläche ein Mindest-Speichervolumen verwendet wird, um die Bereitstellung eines genügend grossen Warmwasservolumens zu gewährleisten. Dies kann bei sehr kleinen Dachflächen in Gebäuden mit grossem Warmwasserbedarf zu im Vergleich zur Kollektorfläche überdimensionierten Speichern führen.

Die Kollektorfläche und das Speichervolumen sind im Datensatz Sonnendach.ch enthalten. Sie sollten im Allgemeinen aber nicht als Empfehlung für die Dimensionierung verwendet werden, sondern dienen einzig der Nachvollziehbarkeit der Berechnung des Wärmeertrags.

7.6. Wärmeertrag

Für die Berechnung des Solarthermie-Potentials wurden durch die Firma Vela Solaris die Abhängigkeiten von den gegebenen Eingangsgrössen wie Standort, Einstrahlung und Aussentemperatur bzw. dem errechneten Energiebedarf für die Brauchwassererwärmung und den Heizwärmebedarf untersucht, um daraus eine Berechnungsformel für den Wirkungsgrad der Solarthermieanlage herzuleiten. Dazu wurden durch Vela Solaris mit der Software Polysun Simulationsreihen mit Variation der verschiedenen Gebäude- und Dachflächen-abhängigen Parameter durchgeführt.

Die Herleitung und die Details der Berechnungsformel sind in der Beilage "Solarkataster Schweiz"³: Abschätzung der Solarthermie-Potentiale" im Detail beschrieben. Die Formel liefert in Abhängigkeit der Einstrahlung, der Kollektorfläche, der Monatsmitteltemperatur, des Monatsdurchschnitts der Ta-

³ Bis die URL für die Publikation bekannt war, lief das Projekt Sonnendach.ch unter der Bezeichnung "Solarkataster Schweiz". Da diese Beilage in einem früheren Projektstadium erstellt wurde, wird darin noch die Bezeichnung "Solarkataster Schweiz" anstelle von Sonnendach.ch verwendet.

gesamtemaximaltemperaturen sowie des monatlichen Warmwasser- und Heizwärmebedarfs einen monatlichen Wirkungsgrad, der je nach Jahreszeit variiert (im Winter ist der Wirkungsgrad höher als im Sommer). Die so berechneten monatlichen Wirkungsgrade werden mit der mittleren Einstrahlung auf die Dachfläche ($\text{kWh/m}^2/\text{Monat}$) und der Kollektorfläche multipliziert, um den Wärmeertrag im jeweiligen Monat zu erhalten. Der jährliche Wärmeertrag ergibt sich aus der Summe der monatlichen Erträge.

An dieser Stelle wird noch einmal darauf hingewiesen, dass der Wirkungsgrad einer Solarthermieanlage in erheblichem Masse von deren Dimensionierung und Abstimmung auf den Bedarf abhängt. Da, wie in Abschnitt 7.4 erläutert, die Abschätzung des Wärmebedarfs mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist, gilt dies auch für die berechneten Wärmeerträge. Eine genaue Berechnung des Wirkungsgrades einer Solarthermieanlage kann letztlich nur mit genauer Kenntnis des Bedarfs erfolgen.

Mehr noch als bei der Photovoltaik erfordert die Planung einer Solarthermieanlage eine sorgfältige Auslegung durch eine Fachperson.

7.7. Anzahl Duschgänge und Deckungsgrad Heizung

Um den errechneten Wärmeertrag für die Nutzer von Sonnendach.ch besser verständlich zu machen, werden diese Werte in Anzahl Duschgänge pro Tag und in einen Deckungsgrad für die Bereitstellung von Heizenergie (Deckungsgrad Heizung) umgerechnet. Dabei besteht die methodische Schwierigkeit, dass sich Wärmeerträge nicht so einfach in Brauchwarmwassernutzung und Heizungsunterstützung aufteilen lassen.

Weil in der Praxis Solarthermieanlagen mehrheitlich für die Erzeugung von Brauchwarmwasser eingesetzt werden, wird für die Berechnung der Anzahl Duschgänge der gesamte Wärmeertrag berücksichtigt. Der jährliche Wärmeertrag wird durch 365 dividiert, um den durchschnittlichen täglichen Wärmeertrag zu erhalten. Dieser Wert wiederum wird durch den Wärmebedarf eines Duschgangs von 1.16 kWh gemäss SIA 385/2 dividiert.

Die Berechnung des solaren Deckungsgrades Heizung basiert auf dem gesamten solaren Deckungsgrad, also dem Anteil des gesamten Wärmebedarfs der durch den Ertrag aus der Solarthermieanlage gedeckt werden kann. Für die Berechnung des solaren Deckungsgrades Heizung $S_{Fn,Heiz}$ wird der gesamte solare Deckungsgrad S_{Fn} für jeden Monat mit dem Heizbedarf gewichtet und für den Jahreswert addiert.

$$S_{Fn,Heiz} = \frac{\sum_{\text{Monat } i} S_{Fn,i} Q_{h,i}}{\sum_{\text{Monat } i} Q_{h,i}}$$

Die Formel lässt sich so interpretieren, dass im Sommer der Heizbedarf sehr klein ist und die produzierte Solarwärme ausschliesslich als Warmwasser genutzt wird.

Aufgrund der methodischen Schwierigkeiten mit der Berechnung des solaren Deckungsgrades Heizung wird zusätzlich auch noch der gesamte solare Deckungsgrad berechnet. Dieser gibt an, welcher Anteil des Gesamtwärmebedarfs durch die Solarthermieanlage auf dieser Dachfläche gedeckt werden kann und berechnet sich einfach aus dem Wärmeertrag im Verhältnis zum Wärmebedarf.



8. Datenmodell

Das Datenmodell mit Objektkatalog ist in einem separaten Dokument "Sonnendach.ch – Datenmodell" im Detail beschrieben. Es gibt für Dachflächen und Fassaden je eine separate Feature Class und eine dazugehörige Tabelle für die Monatswerte. **Tabelle 4** gibt einen Überblick.

| Name | Typ | Inhalt |
|----------------------|---------------|------------------------------------|
| SOLKAT_CH_DACH | Feature Class | Polygon Features Dachflächen |
| SOLKAT_CH_DACH_MONAT | Table | Monatswerte/-parameter Dachflächen |
| SOLKAT_CH_FASS | Feature Class | Polyline Features Fassaden |
| SOLKAT_CH_FASS_MONAT | Table | Monatswerte/-parameter Fassaden |

Tabelle 4: Übersicht aller Feature Classes und Tabellen.

Tabelle 5 und **Tabelle 6** geben eine Übersicht über die in den Feature Classes und Tabellen enthaltenen Attribute mit einer kurzen Beschreibung und einem Verweis zu weitergehenden Erläuterungen in diesem Schlussbericht.

| Name | Erläuterung | Abschnitt Schluss- bericht |
|---------------------|--|----------------------------------|
| DF_UID | Fortlaufende Nummer über den ganzen Datensatz zur Identifikation und zur Verknüpfung von SOLKAT_CH_DACH und SOLKAT_CH_DACH_MONAT. | |
| DF_NUMMER | Fortlaufende Nummer über alle Dachflächen eines Gebäudes. | |
| DATUM_ERSTELLUNG | Datum und Zeit der Erstellung/Berechnung der Dachfläche in Sonnendach.ch | |
| DATUM_AENDERUNG | Datum und Zeit der letzten Änderung. Bei der Ersterfassung gleich dem DATUM_ERSTELLUNG. | |
| SB_UUID | UUID des Gebäudes zu dem die Dachfläche gehört im Datensatz swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | 2.2.1 |
| SB_OBJEKTART | Attribut Objektart übernommen aus dem Datensatz swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 | 2.2.1 |
| SB_DATUM_ERSTELLUNG | Attribut DATUM_ERSTELLUNG (Datum und Zeit) aus den Datensatz swissBUILDINGS ^{3D} 2.0. Wird bei Aktualisierungen von Sonnendach.ch benötigt. | 2.2.1 |
| SB_DATUM_AENDERUNG | Attribut DATUM_AENDERUNG (Datum und Zeit) aus den Datensatz swissBUILDINGS ^{3D} 2.0. Wird bei Aktualisierungen von Sonnendach.ch benötigt. | 2.2.1 |
| KLASSE | Klassifizierung der Dachflächen gemäss der Domäne EIGNUNG_DACH. Die Zuteilung zu den Klassen erfolgt in Abhängigkeit der MSTRABLUNG. | 5.5 |



| Name | Erläuterung | Abschnitt Schluss- bericht |
|---------------------|---|----------------------------------|
| FLAECHE | Nutzbare Fläche der Dachfläche. Entspricht der physischen Dachfläche (geneigte Fläche) und damit der maximalen Modulfläche. | 4.2 |
| AUSRICHTUNG | Ausrichtung der Dachfläche in Grad von Nord (-180°) im Uhrzeigersinn über Ost (-90°), Süd (0°) und West (90°) nach Nord (180°). | 4.2 |
| NEIGUNG | Neigungswinkel der Dachfläche in Grad. 0° = Waagrecht | 4.2 |
| MSTRAHLUNG | Berechnete mittlere jährliche Einstrahlung (Globalstrahlung) pro Quadratmeter (Mittelwert für die Jahre 2004 – 2014) unter Berücksichtigung der Verschattung. | 5.4 |
| GSTRAHLUNG | Berechnete gesamte jährliche Einstrahlung (Mittelwert für die Jahre 2004 – 2014) unter Berücksichtigung der Verschattung. | 5.4 |
| STROMERTRAG | Berechneter Stromertrag. Berechnet sich aus GSTRAHLUNG mit einem Modul-Wirkungsgrad von 17 % und einer Performance Ratio von 80 % wie folgt: $STROMERTRAG = 0.17 * 0.8 * GSTRAHLUNG$. | 6 |
| WAERMEERTRAG | Berechneter Wärmeertrag für die eine repräsentative Systemkonfiguration mit einer dem Bedarf angepassten Anlagengrösse. | 7.6 |
| DUSCHGAENGE | Berechnete durchschnittliche Anzahl Duschgänge pro Tag aus dem (gesamten) Wärmeertrag. | 7.7 |
| DG_HEIZUNG | Berechneter solarer Deckungsgrad Heizung mit dem Heizungsunterstützungsanteil aus dem Wärmeertrag. | 7.7 |
| DG_WAERMEBEDARF | Berechneter solarer Deckungsgrad für den gesamten Wärmebedarf. | 7.7 |
| BEDARF_WARMWASSER | Geschätzter Warmwasserbedarf. Aus den GWR-Daten abgeschätzter Bedarf an Brauchwarmwasser für das Gebäude. | 7.4 |
| BEDARF_HEIZUNG | Geschätzter Heizwärmebedarf. Aus den GWR-Daten abgeschätzter Bedarf an Heizwärme. | 7.4 |
| FLAECHE_KOLLEKTOREN | Kollektorfläche der für die Berechnung verwendeten und dem Bedarf angepassten Solarthermieanlage. | 7.5 |
| VOLUMEN_SPEICHER | Speichervolumen der für die Berechnung verwendeten und dem Bedarf angepassten Solarthermieanlage. | 7.5 |
| GWR_EGID | Eidgenössischer Gebäudeidentifikator (EGID) für den Datensatz aus dem Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) welcher dem Gebäude aus swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 zugeordnet wurde. Wurden dem Gebäude aus swissBUILDINGS ^{3D} 2.0 mehrere GWR-Datensätze zugeordnet, wird zufällig einer ausgewählt. | 7.3 |

Tabelle 5: Übersicht der Attribute für SOLKAT_CH_DACH.



| Name | Erläuterung | Abschnitt Schluss- bericht |
|------------------|--|----------------------------------|
| DF_UID | Fortlaufende Nummer über den ganzen Datensatz zur Identifikation und zur Verknüpfung von SOLKAT_CH_DACH und SOLKAT_CH_DACH_MONAT. | |
| DF_NUMMER | Fortlaufende Nummer über alle Dachflächen eines Gebäudes. | |
| SB_UUID | UUID des Gebäudes zu dem die Dachfläche gehört im Datensatz swissBUILDINGS ^{3D} 2.0. | 2.2.1 |
| MONAT | Kalendermonat. | |
| MSTRAHLUNG_MONAT | Mittlere monatliche Einstrahlung (Globalstrahlung) pro Quadratmeter für die Jahre 2004 – 2014 unter Berücksichtigung der Verschattung. | 5.4 |
| A_PARAM | Mit den Parametern a, b und c lässt sich für den jeweiligen Monat aus den Direktstrahlung (DIR) und DIF-fusstrahlung (DIF) auf eine horizontale Fläche die Strahlung auf die Dachfläche über die Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) annähern. | 5.7 |
| B_PARAM | Siehe A_PARAM | 5.7 |
| C_PARAM | Siehe A_PARAM | 5.7 |
| HEIZGRADTAGE | Monatliche Heizgradtage | 7.2 |
| MTEMP_MONAT | Monatsmitteltemperatur in Grad Celsius | 7.1 |

Tabelle 6: Übersicht der Attribute für SOLKAT_CH_DACH_MONAT.

Die Fassaden sind in Sonnendach.ch als 2D-Polyline-Geometrien in der Feature Class SOLKAT_CH_FASS abgebildet. Statt dem Attribut DF_UID gibt es ein Attribut FF_UID und statt DF_NUMMER steht FF_NUMMER. Das Attribut NEIGUNG fehlt. Für die Monatswerte gibt es eine über die FF_UID verknüpfte Tabelle SOLKAT_CH_FASS_MONAT. Der Objektkatalog für die Fassaden ist ansonsten identisch mit demjenigen der Dachflächen, ausser, dass beim Attribut KLASSE die Abhängigkeit von MSTRAHLUNG anders ist (vgl. Abschnitt 5.6).

9. Validierung

Die Berechnung der Daten in Sonnendach.ch ist in verschiedene Teile gegliedert und bei einigen Berechnungsschritten müssen Annahmen getroffen werden (z.B. Modulwirkungsgrad, Performance Ratio). Es ist daher nicht zielführend, einfach nur die Endergebnisse Strom- und Wärmeertrag zu validieren, sondern es sollen auch die zentralen Eingangsdaten und Berechnungsschritte validiert werden.

Zuerst erfolgt eine Validierung der Strahlungsdaten (vgl. Abschnitt 9.1) und anschliessend des Stromertrags (vgl. Abschnitt 9.2) und des Wärmeertrags (vgl. Abschnitt 9.3).

9.1. Strahlungsdaten

Gemäss dem Produktbeschrieb [6] sind die monatlichen Strahlungswerte genauer als 5 W/m^2 im Mittelland und genauer als 10 W/m^2 in den Alpen, wobei sich diese Angabe auf die mittlere absolute Abweichung (mean absolute error) bezieht. Gemäss einer ausführlichen Validierung der Daten für die Jahre 2004 bis 2011 [7] liegt der mittlere Fehler der Jahreswerte für die Jahre 2004 – 2011 bei $3.45 \pm 5.89 \text{ W/m}^2$ (mean bias error; Mittelwert mit Standardabweichung), der mittlere absolute Fehler (mean absolute error) bei $5.34 \pm 4.54 \text{ W/m}^2$. Eine Abweichung von $3.45 \pm 5.89 \text{ W/m}^2$ entspricht bei einer jährlichen Strahlungssumme von $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{Jahr}$ einer relativen Abweichung von $3.02 \% \pm 5.16 \%$.

Zusätzlich zur dieser bereits erfolgten umfangreichen Validierung ist in Abschnitt 9.1.1 ein Vergleich mit Bodenmessdaten für die Jahreswerte der ganzen in Sonnendach.ch verwendeten Periode 2004 – 2014 zu finden. Dabei wird auch ein Vergleich vorgenommen mit den Strahlungswerten gemäss Meteonorm Version 7.0 und Meteonorm Version 7.1, welche in vielen bisher erstellten Solarkatastern in der Schweiz zur Anwendung gekommen sind. In Abschnitt 9.1.2 wird die Methodik zur Berechnung der Parameter für aktuelle Monatswerte validiert.

9.1.1. Vergleich mit Bodenmessstationen

Bei diesem Vergleich der Strahlungsdaten werden die für Sonnendach.ch verwendeten satellitenbasierten Daten für 10 Standorte mit den Werten der Bodenmessstationen des SwissMetNet verglichen. Gleichzeitig wird die mittlere jährliche Globalstrahlung mit den Werten gemäss Meteonorm Version 7.0 und Version 7.1 verglichen.

Die Daten der Meteonorm an diesen Standorten basieren ebenfalls auf den Messdaten des SwissMetNet, allerdings für eine andere Periode. Die Daten der Meteonorm 7.0 basieren auf der Periode 1986 – 2005 und die Daten der Meteonorm 7.1 auf der Periode 1991 – 2010. Die Meteonorm verwendet wie in der Klimatologie üblich, eine 20-Jahresperiode. Diese wird alle 5 Jahre aktualisiert. Da die Verifikation und das Zusammentragen der weltweiten Daten jeweils 2-3 Jahre in Anspruch nimmt, erfolgt die Aktualisierung mit einer entsprechenden Verzögerung. Daher wurde für die Erstellung der kantonalen Solarkataster Aargau, Glarus, Luzern und Zug in den Jahren 2012/2013 die Meteonorm Version 7.0 verwendet. Für ab 2014 von Meteotest erstellte Solarkataster kamen die Daten von Meteonorm 7.1 zum Einsatz. Um auftretende Abweichungen zwischen den früher erstellten kantonalen und kommunalen Solarkatastern zu erläutern, werden im folgenden Vergleich auch die Daten der Meteonorm 7.0 und 7.1 aufgeführt.

Die Ergebnisse des Vergleichs sind in **Abbildung 22** zu sehen. Für viele Standorte im Mittelland liegen die Bodenmesswerte der Periode 2004 – 2014 deutlich über den Messwerten für die Periode



1986 – 2005, am deutlichsten für Buchs (13 %), Genf (9 %), sowie Luzern und Zürich (je 7 %). Im Vergleich zur Periode 1990 – 2010 ist der Unterschied etwas kleiner. Wie gemäss der Validierung von MeteoSchweiz zu erwarten, liegen die Satellitendaten an den meisten Standorten um 2-3 % höher als die Bodenmesswerte. Dadurch verstärkt sich der Unterschied zwischen den Strahlungsdaten, welche in Sonnendach.ch verwendet werden und der Datenbasis für die kantonalen Solarkataster von Aargau, Glarus, Luzern und Zug.

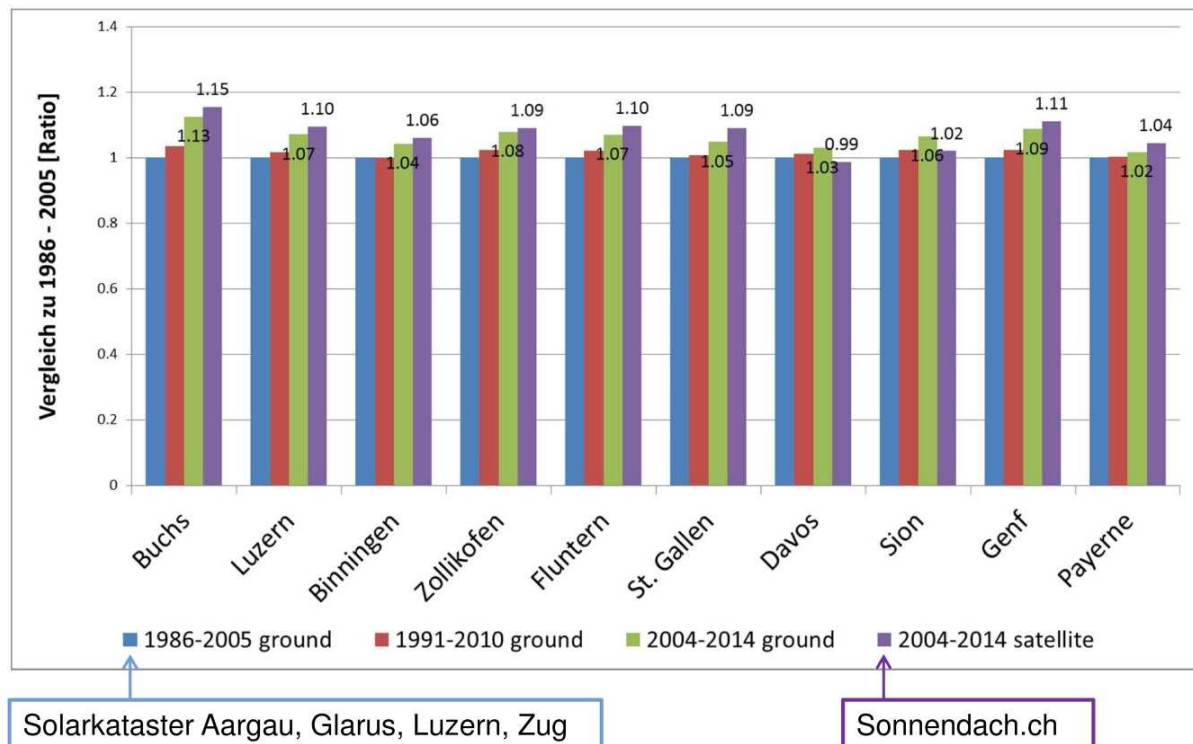


Abbildung 22: Vergleich der in Sonnendach.ch verwendeten satellitenbasierten Strahlungswerte für die Periode 2004 - 2011 (violett mit den Bodenmesswerten des SwissMetNet für die gleiche Periode (grün), den Bodenmesswerten des SwissMetNet für die Periode 1991 – 2010 (rot; entspricht Meteonorm 7.1) und den Bodenmesswerten für die Periode 1986 – 2005 (blau, entspricht Meteonorm 7.0). Meteonorm 7.0 wurde für die kantonalen Solarkataster Aargau, Glarus, Luzern und Zug verwendet. Alle Werte sind relative Werte im Vergleich zu den Bodenmesswerten der Periode 1986 – 2005.

Bei der Umrechnung auf geneigte Dachflächen wird der Unterschied verstärkt (nach Süden ausgerichtete Flächen) oder verkleinert (nach Norden ausgerichtete Dachflächen). Dies deshalb, weil bei einer höheren Strahlung der Anteil der Direktstrahlung zunimmt, welche bei Süddächern einen grösseren Beitrag liefert als bei Norddächern. Eine Analyse für die Jahre 2004 – 2014 für Buchs und Luzern zeigt, dass ein Unterschied von 10 % bei der Globalstrahlung horizontal sich auf 12-13 % bei der Globalstrahlung auf eine 30° geneigte und nach Süden ausgerichtete Fläche verstärkt. Am Standort Buchs, wo die Satellitendaten für Sonnendach.ch 15 % höher liegen als die Bodenmessdaten der Periode 1986 – 2005 können für Süddächer somit Unterschiede im Vergleich mit dem kantonalen Solarkataster von gegen 20 % auftreten.

Es stellt sich damit natürlich die Frage, welche Daten für die Planung von Solaranlagen verwendet werden sollten. Eine abschliessende Antwort auf diese Frage gibt es nicht. Ob es sich bei den höheren Strahlungswerten in den letzten 10 Jahren um eine klimatologische Veränderung handelt, die in

diesem Umfang auch für die kommenden 10 - 20 Jahre fortgesetzt wird, oder ob die Werte für die Periode 2004 – 2014 aufgrund von einigen sehr sonnigen Jahren so hoch sind und die Strahlungswerte in den nächsten Jahren wieder abnehmen, wird erst die Zukunft zeigen. Beide Effekte dürften eine Rolle spielen.

Eine lineare Trendanalyse für die Jahre 1986 – 2009 liefert für die Schweiz einen Trend von $+3.07 \text{ W/m}^2$ pro 10 Jahre [11], eine Analyse für die Jahre 1981 – 2010 liefert einen Trend von $+2.44 \text{ W/m}^2$ pro 10 Jahre [12]). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Strahlungsdaten nicht homogenisiert sind. Gemäss einer Analyse für die Jahre 1981 – 2015 schwankt ein Mittel über 11 Jahre gegenüber einem 20-Jahresmittel klimatologisch um 2 – 3 %. Bei der Periode 2004 – 2014 handelt es nicht um eine 20-Jahresmessreihe (oder gar 30-Jahresmessreihe), die in der Klimatologie üblicherweise verwendet wird, um den Einfluss von Extremjahren zu vermindern. Dies weil die Satellitendaten der MeteoSchweiz erst seit 2004 verfügbar sind. Weil die Satellitendaten einen leicht positiven Bias gegenüber den Bodenmesswerten aufweisen ist davon auszugehen, dass die Strahlungswerte für Sonnendach.ch insbesondere im Mittelland eher etwas zu hoch sind.

9.1.2. Validierung Parameter aktuelle Monatswerte

Bei der Validierung der Parameter zur Berechnung von aktuellen Monatswerten geht es darum, abschätzen zu können, wie genau die Näherung durch die Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) ist (vgl. Abschnitt 5.7). Zu diesem Zweck wird für jeden Monat der Periode 2004 – 2014 für eine Auswahl von 10 Standorten und unter Variation der Ausrichtung, Neigung und des Horizonts die Strahlung auf die geneigte Fläche GK direkt mit dem Perez-Modell berechnet (gemäss Abschnitt 5.4). Dieser Wert wird verglichen mit der Näherung mittels der Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$).

Die 10 Standorte sind die gleichen wie in Abschnitt 9.1.1. Die Neigungswerte sind 15° , 30° , 45° und 90° , die Ausrichtungen -180° , -135° , -90° , -45° , 0° , 45° , 90° , 135° . Für den Horizont wird ein konstanter Horizont verwendet mit den Horizonthöhen 0° , 10° und 20° . Mit den 4 Neigungen, 8 Ausrichtungen, 3 Horizonthöhen, 10 Standorten, 11 Jahren und 12 Monaten ergeben sich insgesamt 126'720 Kombinationen. Für jede Kombination wird der relative Fehler ($\text{GK_Linearkombination} - \text{GK_Perez} / \text{GK_Perez}$) berechnet. Die Verteilung dieses relativen Fehlers weist einen Mittelwert von 0.05 % und eine Standardabweichung von 2.2 % auf. Wird der Betrag des relativen Fehlers betrachtet, so liegt dieser für 95 % der Fälle unter 4.5 % und für 99 % der Fälle unter 8 %.

Um einzuschätzen, in welchen Fällen die Näherungsmethodik genauer und in welchen sie weniger genau ist, wurde die Verteilung des relativen Fehlers für jeweils einen Einflussfaktor separat betrachtet. Die Schwankung des Fehlers über die Jahre, zwischen den Standorten, in Abhängigkeit der Horizonthöhe und der Ausrichtung ist gering. Bei der Neigung hingegen ist nicht überraschend ein klarer Trend erkennbar: mit stärkerer Neigung nimmt auch der Fehler zu. Für die Neigungen 15° , 30° , 45° und 90° liegt die 95 %-Perzentile des Betrags des relativen Fehlers bei 2.4 %, 3.4 %, 4.2 % und 6.3 %.

Insgesamt ist die Methodik, die Strahlung auf die geneigte Fläche mit einer Linearkombination ($a \cdot \text{DIR} + b \cdot \text{DIF} + c$) anzunähern also erstaunlich genau. Einzig bei Fassaden ist sie mit einer gewissen Vorsicht zu verwenden.



9.2. Stromertrag

Wie bereits in Abschnitt 6 erläutert, hängt der Stromertrag einer PV-Anlage nicht nur von der Fläche und der Einstrahlung ab, sondern auch vom Wirkungsgrad der eingesetzten Module und von weiteren Faktoren, die in der sogenannten Performance Ratio zusammengefasst werden können. Da es insbesondere beim Wirkungsgrad eine grosse Bandbreite gibt, sollte sich die Validierung auf die Performance Ratio konzentrieren. Dabei ist zu beachten, dass sich die Performance Ratio von PV-Anlagen ähnlich wie der Wirkungsgrad der Module in den vergangenen Jahren laufend verbessert hat.

Eine umfangreiche Studie [13] des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme kommt zum Schluss, dass die Performance Ratio von in den 90er Jahren gebauten PV-Anlagen typischerweise zwischen 60 % und 80 % lag, bei einer neueren Studie 2010 dann aber zwischen 70 % und 90 %, mit einem Median von 84 %. Da es sich bei den knapp 100 Anlagen in dieser Studie um grosse Anlagen in Deutschland und damit wohl mehrheitlich um Freiflächenanlagen handelt, dürften diese Werte für Dachanlagen in der Schweiz eher zu hoch sein.

Langjährige Messreihen, welche die ganze für Sonnendach.ch verwendete Periode 2004 – 2014 abdecken, sind selten. Das Labor für Photovoltaik der Berner Fachhochschule BFH in Burgdorf verfügt über solche langjährigen Messreihen für eine Reihe von Anlagen. Mit einem Schwerpunkt in Burgdorf decken die Anlagen alle Klimazonen in der Schweiz (Jura, Mittelland, Alpen) ab. Es liegen nicht nur Produktionsdaten für diese Anlagen vor, sondern auch Strahlungsmessungen mit Pyranometern in der Modulebene. Diese Daten ermöglichen somit einen Vergleich der berechneten Strahlungswerte auf die geneigte Fläche mit Messwerten. Zum anderen liegen für die Anlagen in der Langzeitmessung der BFE auch Angaben zur Performance Ratio vor. Die Resultate der Validierung mit den Daten der BFE sind in Abschnitt 9.2.1 aufgeführt.

Da es sich bei den Anlagen in der Langzeitmessung der BFH um ältere Anlagen handelt und für eine statistische Aussage Daten von einigen hundert Anlagen wünschenswert sind, werden die Produktionswerte gemäss Sonnendach.ch auch mit gemessenen Produktionswerten von KEV-Anlagen verglichen. Die Firma TNC Consulting AG hat für eine Untersuchung der Funktion von PV-Anlagen im Rahmen des IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) die Produktions- und Anlagendaten für über 1'000 KEV-Anlagen in der Schweiz aufbereitet. Diese Daten sind Eigentum der Swissgrid AG und wurden für die Validierung von Sonnendach.ch zur Verfügung gestellt. Die Resultate dieser Validierung mit Produktionsdaten von KEV-Anlagen sind in Abschnitt 9.2.2 aufgeführt.

9.2.1. Validierung mit langjährigen Messreihen der BFH Burgdorf

Die Langzeitmessungen des Labors für Photovoltaik der BFH Burgdorf umfassen 14 PV-Anlagen, die teilweise mehrere Teilanlagen aufweisen. Davon wurden 7 Anlagen mit insgesamt 10 Teilanlagen für die Validierung ausgewählt. Die Daten wurden von der BFH Burgdorf für die vorliegende Validierung aufbereitet. Ausgewählt wurden jene Anlagen, für die mindestens für 10 Jahre der Periode 2004 – 2014 Messwerte vorliegen. Umfangreiche Informationen zu den Anlagen sind auf der Webseite des Labors für Photovoltaik (<http://www.pvtest.ch>) zu finden. Von den 10 Teilanlagen liegen 5 in Burgdorf (Gfeller, NewTech1-3, Schlossmat), eine im Jura (Mont-Soleil), eine im Baselbiet (Liestal) und drei im Berner Oberland (Birg, Jungfrauojoch).

In **Tabelle 7** sind die Ergebnisse der Validierung zusammengefasst. Die Spalte 'Abweichung GK' zeigt die relative Abweichung der mit der Methodik von Sonnendach.ch berechneten Strahlungswerte auf die geneigte Fläche im Vergleich mit den Messwerten der Pyranometer auf den Anlagen. Eine positive

Abweichung bedeutet, dass die berechneten Werte höher liegen. Da die meisten Anlagen nicht im Gebiet liegen, für das Sonnendach.ch bereits berechnet wurde, konnte nur der Fernhorizont bei der Berechnung berücksichtigt werden. Das ist in der Regel kein Problem, weil die Anlagen so erstellt wurden, dass die Verschattung durch einen Nahhorizont vernachlässigbar sein sollte. Eine Ausnahme bildet die Anlage Gfeller, bei der ein nahegelegener Baum die Anlage zunehmend verschattet hat.

Für die alpinen Anlagen (Birg, Jungfrauoch) ist die Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten sehr gut. Auch die Performance Ratio liegt mit 75 % resp. 81 % im Bereich der für Sonnendach.ch verwendeten 80 %, obwohl es sich auch hier um ältere Anlagen handelt. Der Grund liegt in den tieferen Temperaturen in der Höhe, welche zu einer höheren Performance Ratio führen. Bei den übrigen 7 Teilanlagen liegen die berechneten Strahlungswerte rund 6 % über den gemessenen Werten, mit der Ausnahme der Anlage Gfeller, wobei hier der oben erwähnte Baum der Grund für die höhere Abweichung sein dürfte.

Die hier festgestellt Abweichung von 6 % bei den Anlagen im Mittelland liegt etwas höher, als die durchschnittliche Abweichung von 3 % der Globalstrahlung horizontal (vgl. Abschnitt 9.1.1). Zum einen verstärkt sich die Abweichung bei der Umrechnung auf die geneigte Fläche, zum anderen sind auch geringfügige Fehler der Messungen nicht auszuschliessen. Insgesamt bestätigt die Validierung der Strahlungsdaten auf geneigte Flächen mit den Langzeitmessungen der BFH Burgdorf das Ergebnis in Abschnitt 9.1.1 wonach die Strahlungswerte für Sonnendach.ch insbesondere im Mittelland eher etwas zu hoch sind.

Bezüglich der Performance Ratio liegen alle Anlagen im Bericht der 60 % bis 80 %, wie es für ältere Anlagen gemäss der in Abschnitt 9.2 erwähnten Studie zu erwarten ist.

| Anlage | Ausrichtung [°] | Neigung [°] | Abweichung GK | Performance Ratio |
|------------------|-----------------|-------------|---------------|-------------------|
| Gfeller | -10 | 28 | 7.7 % | 66.0 |
| NewTech1 | 0 | 30 | 6.3 % | 69.7 |
| NewTech2 | 0 | 30 | 6.3 % | 67.6 |
| NewTech3 | 0 | 30 | 6.3 % | 70.9 |
| Schlossmatt | -7 | 30 | 5.9 % | 72.9 |
| Mont-Soleil | -26 | 50 | 5.9 % | 70.0 |
| Liestal | 0 | 30 | 6.1 % | 63.5 |
| Birg | 5 | 90 | 1.7 % | 75.3 |
| Jungfrauoch Ost | 12 | 90 | 1.9 % | 80.6 |
| Jungfrauoch West | 27 | 90 | -1.8 % | 80.6 |

Tabelle 7: Übersicht über die Ergebnisse der Validierung mit den Langzeitmessdaten der BFH Burgdorf. Die Abweichung GK ist die relative Differenz zwischen den berechneten Strahlungswerten gemäss Sonnendach.ch und den mit Pyranometern auf den Anlagen gemessenen Werten. Die angegebene Performance Ratio ist der Durchschnitt der jährlichen Performance Ratio für die Jahre 2004 – 2014.



9.2.2. Validierung mit Produktionswerten von KEV-Anlagen

Von den KEV-Anlagen, für welche Daten vorliegen, werden nur jene Anlagen für die Validierung verwendet, die über eine einheitliche Ausrichtung und Neigung verfügen. Bei den Anlagen mit mehreren Ausrichtungen und/oder Neigungen ist aus den Daten nicht eindeutig ersichtlich, welche Ausrichtung/Neigung welchen Anteil zur Gesamtleistung der Anlage beiträgt. Mit der Einschränkung auf Anlagen mit einheitlicher Ausrichtung/Neigung verbleiben noch gut 700 Anlagen, für die mindestens ein vollständiges Jahr an Produktionsdaten vorliegt.

Da nur ein Teil der Anlagen im Gebiet liegt, für das Sonnendach.ch bereits vorliegt, kann analog der Validierung in Abschnitt 9.2.1 nur der Fernhorizont berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass kaum eine der KEV-Anlagen über einen signifikanten Nahhorizont verfügt. Andererseits ist es so, dass die Strahlungswerte in Sonnendach.ch die mittlere Strahlung auf einer Dachfläche angeben. Bei Dachflächen, die eine Teilverschattung aufweisen, können die Strahlungswerte innerhalb der Dachfläche erheblich variieren. Würden direkt die Angaben aus Sonnendach.ch verwendet, könnten diese zu tief sein, wenn die Anlage nur auf dem nicht oder wenig verschatteten Teil der Dachfläche realisiert wurde. Es ist daher sachgerechter, für die Validierung mit den Anlagedaten nur den Fernhorizont zu berücksichtigen.

Die Performance Ratio berechnet sich aus der jährlichen Globalstrahlung [kWh/m²/Jahr], der installierten Leistung [kWp] und der Stromproduktion [kWh/Jahr] durch

$$\text{Performance Ratio} = \frac{\text{Stromproduktion}}{\text{Installierte Leistung} * \text{Jährliche Globalstrahlung}}$$

Liegen also die berechneten Strahlungswerte in der Tendenz eher zu hoch, was gemäss Abschnitt 9.1.1 der Fall ist, so liegen die damit berechneten Werte für die Performance Ratio eher etwas zu tief.

Für die Analyse wurden Anlagen ausgeschlossen, die eine Performance Ratio von weniger als 65 % oder mehr als 95 % ausweisen. Da die Anzahl der Anlagen, für die Produktionsdaten vorliegen, für die Jahre 2009 bis 2014 sehr unterschiedlich ist, wurde die Analyse für jedes Jahr separat durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

| Jahr | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Anzahl Anlagen | 101 | 182 | 262 | 521 | 599 | 702 |
| Mittelwert | 74.3 % | 72.8 % | 75.5 % | 74.8 % | 74.8 % | 78.9 % |
| Standardabweichung | 4.3 % | 4.9 % | 5.0 % | 4.9 % | 5.1 % | 5.6 % |
| 5 %-Perzentile | 66.9 % | 66.0 % | 67.1 % | 66.8 % | 66.7 % | 69.4 % |
| Median | 74.5 % | 72.2 % | 76.1 % | 74.6 % | 74.7 % | 79.3 % |
| 95 %-Perzentile | 80.4 % | 81.0 % | 82.9 % | 82.3 % | 83.3 % | 87.3 % |

Tabelle 8: Performance Ratio aus der Validierung mit den Produktionsdaten der KEV-Anlagen.

Der Mittelwert der Performance Ratio liegt zwischen 72.8 % (2010) und 78.9 % (2014). Die breiteste Datenbasis liegt für das Jahr 2014 mit gut 700 Anlagen vor. Die Performance Ratio liegt für 90 % der Anlagen zwischen 69.4 % und 87.3 %, mit einem Median von 79.3 %. Diese Werte haben eine sehr

gute Übereinstimmung mit der für Sonnendach.ch verwendeten Performance Ratio von 80 %. In den Jahren davor liegen die Werte etwas tiefer.

Insgesamt zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den für die Berechnung in Sonnendach.ch getroffenen Annahmen, zumal die berechneten Strahlungswerte eher einen leicht positiven Bias aufweisen und somit die berechneten Werte für die Performance Ratio eher etwas zu tief sind.

Es ist nicht überraschend, dass die Werte tiefer ausfallen als in der Studie des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme [13], da es sich bei den KEV-Anlagen um viele kleinere Anlagen und meist Aufdachanlagen oder dachintegrierte Anlagen handelt. Bei diesen ist die Modultemperatur bei gleicher Lufttemperatur höher als bei Freiflächenanlagen, wie sie in der Studie [13] untersucht wurden.

In der oben erwähnten Untersuchung der Funktion von PV-Anlagen im Rahmen des IEA Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) durch die Firma TNC Consulting AG wird die Performance Ratio mit Hilfe von interpolierten Strahlungsdaten von Bodenmessstationen ermittelt. Die Ergebnisse liegen noch nicht vor. Es wird interessant sein zu sehen, welche Unterschiede durch die unterschiedlichen Strahlungsdaten resultieren.

9.3. Wärmeertrag

Für den Wärmeertrag wird einerseits die verwendete Näherungsformel validiert (Abschnitt 9.3.1) und andererseits werden die Solarthermieerträge mit denen real existierender Anlagen verglichen (Abschnitt 9.3.2).

9.3.1. Validierung Näherungsformel

Die Validierung der Näherungsformel ist in der Beilage "Solarkataster Schweiz: Abschätzung der Solarthermie-Potentiale"⁴ im Detail beschrieben. Insgesamt wird für 12'771 Anlagen der mit der Näherungsformel berechnete Wirkungsgrad der Anlage mit dem direkt simulierten Wert der Anlage verglichen. Es werden 43 über die ganze Schweiz verteilte Standorte, 3 Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Bürogebäude) und drei verschiedene Dämmstandards betrachtet. Für jede Kombination wird zusätzlich zwischen 9 Ausrichtungen (-180°, -135°, -90°(Ost), -45°, 0°(Süd), 45°, 90°(West), 135°) und vier Neigungen (15°, 30°, 45°, 90°) unterschieden. Zusätzlich wird noch eine flache Dachfläche berücksichtigt. Damit wird das gesamte Spektrum von Dachflächen, die in Sonnendach.ch auftreten können, abgedeckt.

Im Mittel liegt der jährliche Wirkungsgrad dieser 12'771 Anlagen bei 0.275 (simuliert: 0.280). Die mittlere absolute Abweichung (mean absolute error) zwischen den mit der Näherungsformel berechneten und den simulierten Wirkungsgraden liegt bei 0.039, die mittlere quadratische Abweichung (root mean square error) bei 0.054. Die grössten Abweichungen treten bei nach Norden, Nordosten oder Nordwesten ausgerichteten Fassaden auf. Insgesamt ist die Übereinstimmung insbesondere bei den Dachflächen mit mittlerer und hoher Einstrahlung sehr gut.

⁴ Bis die URL für die Publikation bekannt war, lief das Projekt Sonnendach.ch unter der Bezeichnung "Solarkataster Schweiz". Da diese Beilage in einem früheren Projektstadium erstellt wurde, wird darin noch die Bezeichnung "Solarkataster Schweiz" anstelle von Sonnendach.ch verwendet.



9.3.2. Vergleich mit Messwerten existierender Anlagen

Im Gegensatz zur Photovoltaik, wo Dank den KEV-Anlagen viele Produktionsdaten vorliegen und eine systematische Überwachung der Anlagen weit verbreitet ist, wurde die Überwachung von Solarthermieranlagen lange Zeit vernachlässigt. In den Jahren 2013 – 2014 wurde im Projekt "Funktions-Check Solarthermie" eine automatische online-Anlagenüberwachung für Solarthermie-Anlagen entwickelt. Das Projekt wurde von der EGON AG in Zusammenarbeit und mit Unterstützung vom Bundesamt für Energie (BFE), Ernst Schweizer AG, Industrielle Werke Basel, Steca Elektronik GmbH und Meteotest durchgeführt. Das Projekt zeigte, dass viele Solarthermieranlagen nicht den erwarteten Ertrag liefern und somit eine Anlagenüberwachung durchaus sinnvoll ist.

Aus diesem Projekt werden Daten von Anlagen, für die mindestens für ein ganzes Kalenderjahr lückenlos Messwerte vorliegen mit den Berechnungen in Sonnendach.ch verglichen. Es handelt sich um insgesamt 7 Anlagen. Der Vergleich erlaubt somit keine statistische signifikante Aussage, gibt aber doch einen Hinweis, wie die in Sonnendach.ch angegebenen Werte einzuschätzen sind. Für die Ertragsberechnung wird die gleiche Methodik wie in Sonnendach.ch verwendet. Der Vergleich erfolgt für das Jahr 2014 und falls da keine Daten vorhanden sind für das Jahr 2013. Es werden die Strahlungswerte für das jeweilige Jahr verwendet. Die Kollektorfläche ergibt sich aus den Daten der Anlage. Weiter wird angenommen, dass die Anlagen zur Brauchwarmwasseraufbereitung benutzt werden. Da keine Angaben zum Warmwasserbedarf vorliegen, wird dieser rückwärts aus der Anlagengrösse berechnet, mit der gleichen Methodik welche in Sonnendach.ch für die Dimensionierung der Anlage verwendet wird. Dabei wird mit einer Anlagenfläche von 1.2 m² pro Person die Anzahl Personen und daraus der Warmwasserbedarf abgeleitet.

Aus Datenschutzgründen können hier keine Details zu den Anlagen bekannt gegeben werden. Die Abweichung des berechneten jährlichen Wärmeertrages vom gemessenen jährlichen Wärmeertrag beträgt für die 7 Anlagen: -22 %, -8 %, -6 %, -4 %, 3 %, 4 %, 11 %. Dabei bedeutet eine negative Abweichung, dass die berechneten Werte tiefer liegen als die gemessenen Werte. Im Mittel liegen die berechneten Erträge um rund 3 % tiefer als die gemessenen Erträge. Die Abweichung ist also im Mittel sehr gering und bei 5 der 7 Anlagen ist der Betrag der Abweichung kleiner als 8 %.

Insgesamt ergibt sich also eine sehr gute Übereinstimmung mit real existierenden Anlagen. Die Anlagen für den Vergleich wurden bewusst so ausgewählt, dass es sich um gut funktionierende Anlagen handelt. Somit kann als Fazit festgehalten werden, dass die Angaben für den Wärmeertrag in Sonnendach.ch gut mit den Messwerten von gut funktionierenden Solarthermieranlagen übereinstimmen.



10. Schlussbemerkungen

Sonnendach.ch gibt Angaben zum Solarenergiepotenzial auf Dachflächen und Fassaden. Die Angaben eignen sich, um einen ersten Richtwert zu erhalten, welches Potenzial für Sonnenenergienutzung auf einem Dach oder einer Fassade besteht. Die Berechnung von Sonnendach.ch erfolgt grösstenteils automatisiert. Einzelne fehlerhafte Angaben sind daher nicht auszuschliessen. Die Angaben in Sonnendach.ch ersetzen nicht die Beratung durch eine Fachperson (Photovoltaik, Solarthermie).

Die in Sonnendach.ch angegebenen Strahlungswerte sind Mittelwerte für eine Dachfläche. Bei einer Teilverschattung der Dachfläche können die Strahlungswerte innerhalb der Dachfläche erheblich variieren und somit auf Teilen der Dachfläche höhere Werte auftreten.

Die wichtigsten Annahmen, auf denen die Angaben basieren sind ein Modulwirkungsgrad von 17 % und eine Performance Ratio von 80 % bei Photovoltaikanlagen. Die Erträge für Solarthermie basieren auf einer mit Hilfe von statistischen Daten (GWR) dimensionierten Anlage.



11. Referenzen

- [1] Produktinformation swissBUILDINGS^{3D} 2.0. Abrufbar unter http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/swissBUILDINGS_3D_2.0_V2.html
- [2] swissALTI^{3D}: Produktbeschreibung abrufbar unter <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>
- [3] DOM: Produktbeschreibung abrufbar unter http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom_dtm-av.html
- [4] SRTM: Informationen abrufbar unter <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [5] Eidgenössisches Gebäude- und Wohnungsregister. Merkmalskatalog. Version 3.6. Neuchâtel, 2012. Abrufbar unter <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/09/22/publ.html?publicationID=5007>
- [6] Documentation of MeteoSwiss Grid Data Products: Daily, monthly and yearly satellite-based global radiation. Reto Stöckli, February, 2013. Abrufbar unter http://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-globalstrahlung/doc/ProdDoc_MSG.SIS.pdf
- [7] Reto Stöckli: The HelioMont Surface Solar Radiation Processing. Scientific Report MeteoSwiss No. 93. 2013. Abrufbar unter <http://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/en/Ungebundene-Seiten/Publikationen/Scientific-Reports/doc/sr93stoeckli.pdf>
- [8] Perez, R., R. Stewart, C. Arbogast, R. Seals and J. Scott: An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: Description, performance validation, site dependency evaluation. Solar Energy, 36, 6, 481-497, 1986.
- [9] Meteonorm - Global Meteorological Database. Handbook part II: Theory. Version 7.1, July 2015. Abrufbar unter http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn71_theory.pdf
- [10] Documentation of MeteoSwiss Grid Data Products: Daily Mean, Minimum and Maximum Temperature: TabsD, TminD, TmaxD. Abrufbar unter http://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-temperatur/doc/ProdDoc_TabsD.pdf
- [11] Jan Remund: Analysis of recent trends of global radiation ground measurements, Final report IEA SHC Task 36, 2010. Abrufbar unter http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/ieashc36_report_trends_globalradiation.pdf
- [12] A. Sanchez-Lorenzo, M. Wild: Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. Atmos. Chem. Phys., 12, 8635–8644, 2012. Abrufbar unter <http://www.atmos-chem-phys.net/12/8635/2012/acp-12-8635-2012.pdf>
- [13] N.H. Reich, B. Müller, A. Armbruster, K. Kiefer, W.G.J.H.M. van Sark, Ch. Reise: Performance Ratio revisited: are PR > 90% realistic? Progress in Photovoltaics, 20, 6, 717-726, 2012.