



Bern, 19. Dezember 2012

Solarkataster Opfikon

Schlussbericht

Auftraggeber:

Stadt Opfikon
Herr Daniel Martinelli
Oberhauserstrasse 25
CH - 8152 Glattbrugg

Das Solarkataster ist eine Solarpotenzialanalyse. Es eignet sich, um einen ersten Richtwert zu erhalten, welches Potenzial für Sonnenenergienutzung auf einem Dach besteht. Die Erstellung des Solarkatasters erfolgt teilweise automatisiert. Einzelne fehlerhafte Angaben sind nicht auszuschliessen. *METEOTEST* übernimmt keine Haftung für die Richtigkeit der Angaben und deren Folgen. Dieses Solarkataster ersetzt nicht die Beratung durch eine Fachperson (Photovoltaik, Solarthermie).

Version	Datum	Dokument	Projektnummer
1	03.12.2012	Schlussbericht	12_085
2	19.12.2012	Ergänzung zusätzliche Dachparameter	12_085

Bearbeitung	Name	Datum
Erstellt von	Daniel Klauser	19.12.2012
Kontrolliert von	Barbara Huguenin-Landl	19.12.2012
Genehmigt von	René Cattin	19.12.2012

METEOTEST gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fachgerechte Auftragsabwicklung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässigen wegbedungen.

Zusammenfassung

Die Stadt Opfikon hat die *Osterwalder Lehmann Ingenieure und Geometer AG* und *METEOTEST* Ende August 2012 mit der Erstellung eines Solarkatasters für die Stadt Opfikon beauftragt. Als Datengrundlage für das Oberflächenmodell wurden aktuelle Luftbilder aus dem Frühjahr 2012 von der Firma Flotron AG ausgewertet.

Im Solarkataster werden pro Dachfläche die Ausrichtung, Neigung, Fläche sowie die Einstrahlung und der zu erwartende elektrische Ertrag angegeben. Das Solarkataster liegt als digitaler Vektordatensatz vor.

Inhalt

1	Datengrundlagen	5
1.1	Geodaten.....	5
1.2	Einstrahlungsdaten.....	5
2	Methodik.....	6
2.1	Gebäude, Ausrichtung, Neigung.....	6
2.2	Dachflächenanalyse	6
2.3	Horizontanalyse.....	8
2.4	Strahlungsberechnung.....	8
3	Ergebnisse Solarpotenzialanalyse	11
3.1	Einstrahlungskarte.....	11
3.2	Solarkataster Version 1 (Gebäude).....	11
3.3	Solarkataster Version 2 (Dachflächen)	13
3.4	Umrechnung in elektrische Energie	15
3.5	Installierte elektrische Leistung pro Fläche	16
3.6	Solarthermische Nutzung (Sonnenkollektoren).....	16
3.7	Photovoltaik- und Solarthermie-Potenzial für die Stadt Opfikon	17

1 Datengrundlagen

1.1 Geodaten

Als Datengrundlage für die Oberfläche diente ein digitales Oberflächenmodell DOM mit einer Auflösung von 20 x 20 cm, das von der Firma Flotron AG auf der Basis aktueller Luftbilder aus dem Frühjahr 2012 abgeleitet wurde. Das DOM bildet die beständig sichtbare Oberfläche ab und beinhaltet somit Wälder, Gebäude und weitere Kunstbauten.

Weiter standen die Grundrisse der Gebäude aus der amtlichen Vermessung zur Verfügung. Die Gebäudegrundrisse werden dazu verwendet, die zu betrachtenden Gebäude aus dem Oberflächenmodell auszuschneiden.

1.2 Einstrahlungsdaten

Die Berechnung der Einstrahlung erfolgte mit dem *METEOTEST*-eigenen Produkt *meteonorm*¹. *meteonorm* ist eine umfassende meteorologische Referenz. Diese ermöglicht den Zugriff auf meteorologische Daten für solare Anwendungen, System-Design und eine breite Reihe anderer Anwendungen für jeden beliebigen Ort der Welt.

Zahlreiche globale und regionale Datenbanken wurden auf ihre Zuverlässigkeit geprüft und in der *meteonorm* Datenbank kombiniert. Die wichtigsten Datenquellen sind GEBA (Global Energy Balance Archive), World Meteorological Organization (WMO / OMM) Klimanormalwerte 1961–1990 und die Schweizer Datenbank von MeteoSchweiz. Insgesamt basiert *meteonorm* auf Wetterdaten von 8'300 Wetterstationen. In der Schweiz mit ihrer hohen Stationsdichte und dank dem Einbezug von Satellitendaten ist die Qualität der Daten besonders hoch. Die Unsicherheit des langjährigen Jahreswerts auf geneigte Flächen (30 Grad Süd) beträgt für die Stadt Opfikon rund 5%.

Ausgehend von den monatlichen Werten (Stationsdaten, interpolierte Daten oder importierte Daten), berechnet *meteonorm* stündliche Werte aller Parameter mit Hilfe eines stochastischen Modells. Die resultierende Zeitreihe entspricht einem "typischen Jahr".

Es wurde die im Mai 2012 erschienene Version 7 der *meteonorm* verwendet. Die Einstrahlungsdaten für das Solarkataster der Stadt Opfikon basieren auf mittleren Messwerten der Periode 1986 bis 2005. Dies ist die aktuellste europaweit verfügbare 20-Jahresperiode. Die *meteonorm* verwendet aus Gründen der Vergleichbarkeit verschiedener Standorte in Europa diese Periode.

¹ <http://www.meteonorm.com>

2 Methodik

2.1 Gebäude, Ausrichtung, Neigung

Die Arbeitsschritte und Ergebnisse werden im Folgenden anhand des Beispielgebiets Bettackerstrasse (Abbildung 1) erläutert.



Abbildung 1: Luftbild für das Beispielgebiet Bettackerstrasse. (Quelle: Google Earth, © 2010 Google Earth).

Mit Hilfe der Gebäudegrundrisse wurde aus dem DOM in einem ersten Schritt ein Oberflächenmodell (Beispiel: Abbildung 2) abgeleitet, welches nur die zu betrachtenden Gebäude enthält (Gebäudeoberflächenmodell). Dies erlaubt es, die Rechenzeit der nachfolgenden Schritte erheblich zu reduzieren. In einem zweiten Schritt wurde für jeden Rasterpunkt im Gebäudeoberflächenmodell die Ausrichtung und Neigung berechnet.

2.2 Dachflächenanalyse

Das DOM liegt als 20 cm-Raster vor und enthält deshalb keine Information über die einzelnen Dachflächen (keine Vektordaten). Um Aussagen über einzelne Dachflächen (Ausrichtung, Neigung, Einstrahlung) machen zu können, müssen diese zuerst erkannt werden. *METEOTEST* hat zu diesem Zweck eine eigene Software entwickelt, welche aus den DOM-Daten für ein Gebäude die einzelnen Dachflächen des Gebäudes automatisch erkennt. Das Ergebnis hängt stark von der Qualität der DOM-Daten und der Komplexität der Dachformen ab. Während einfache Dachformen in der Regel sehr gut erkannt werden, kann das Ergebnis bei komplexen Dachstrukturen oder Dächern mit vielen Dachaufbauten nicht ganz der Realität

entsprechen. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Dachflächenextraktion für das Beispielgebiet Bettackerstrasse. Bei Reihenhäusern wurden die Dachflächen pro Gebäude (gemäss den Gebäudegrundrissen) einzeln erfasst.

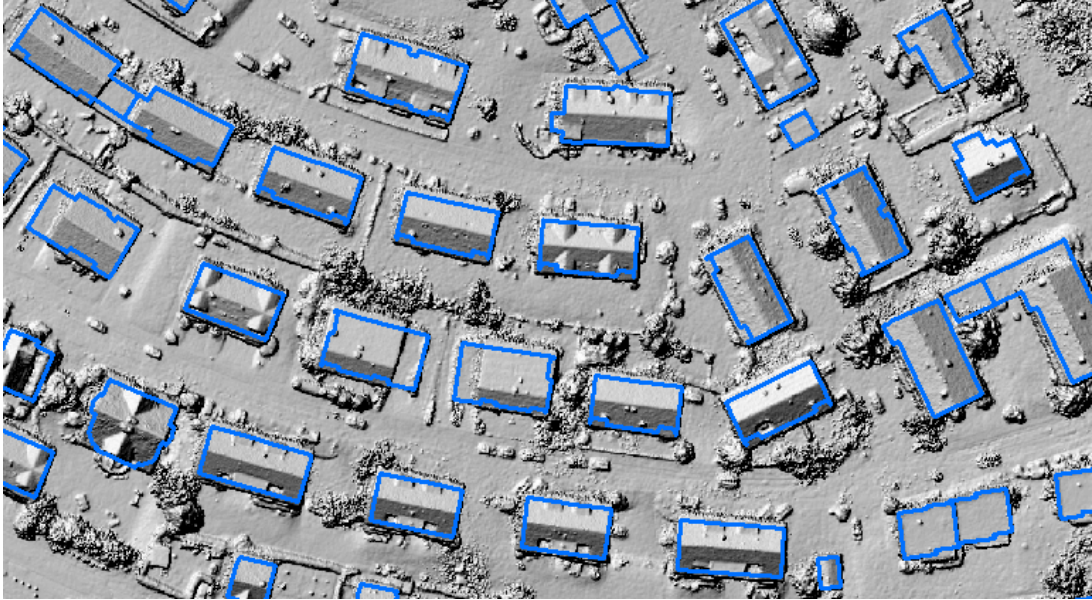


Abbildung 2: DOM (Schattierung) und Gebäudegrundrisse in blau für das Beispielgebiet Bettackerstrasse.

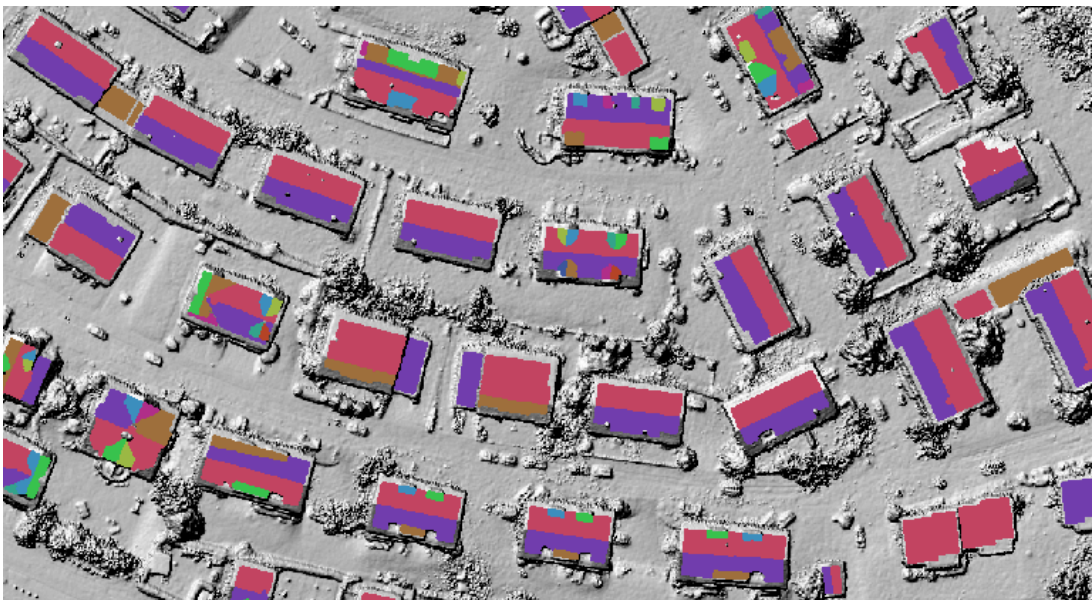


Abbildung 3: Ergebnis der Dachflächenextraktion (jede Fläche eine eigene Farbe) für das Beispielgebiet Bettackerstrasse.

2.3 Horizontanalyse

Die Horizontanalyse wurde für alle Rasterpunkte innerhalb der Gebäudegrundrisse mit einer horizontalen Auflösung von 5 Grad und einer vertikalen Auflösung von 1 Grad durchgeführt. Dabei wurde der Nahhorizont (benachbarte Gebäude, Bäume, etc.) innerhalb eines Radius von 20 m aus dem 20-cm-DOM, innerhalb eines Radius von 100 m aus einem abgeleiteten 1-m-DOM und innerhalb eines Radius von 1'000 m aus einem abgeleiteten 10-m-DOM berechnet. Die Berechnung des Fernhorizontes (Hügel, Berge) erstreckte sich auf einen Radius von 25 km. Dafür wurde das digitale Terrainmodell der Schweiz mit einer Auflösung von 100 m verwendet. Wenn die Berechnung des Horizonts einen negativen Wert aufwies, wurde der Horizontwert auf 0 gesetzt.

2.4 Strahlungsberechnung

Abbildung 4 zeigt die Eingangsdaten für die Strahlungsberechnung mit der Software *meteonorm* schematisch.

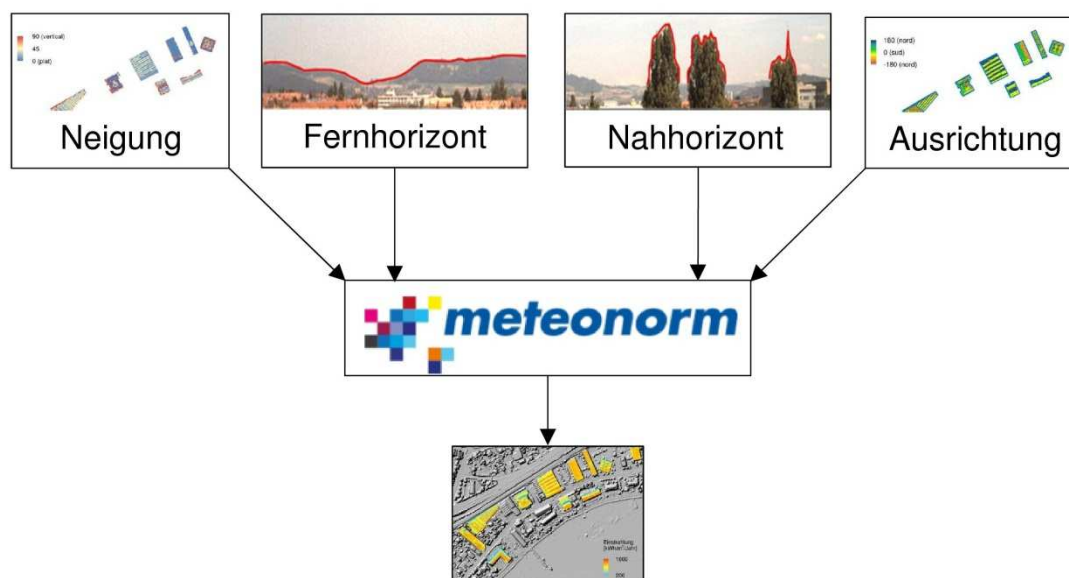


Abbildung 4: Ablauf der Strahlungsberechnung mit *meteonorm*.

In einem ersten Schritt wurde mit der Software *meteonorm* für die Stadt Opfikon die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche für jede Stunde eines typischen Jahres berechnet. Die Verschattung wurde dabei noch nicht berücksichtigt. Die jährliche Globalstrahlung auf eine unverschattete horizontale Fläche in Opfikon beträgt 1'113 kWh/m². Tabelle 1 zeigt einen Vergleich mit anderen Städten in der Deutschschweiz. Der Anteil der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung und die Monatswerte der Strahlung sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Diffusstrahlung macht einen beträchtlichen Anteil der verfügbaren Gesamteinstrahlung aus.

Tabelle 1: Vergleich der jährlichen Einstrahlung für verschiedene Städte.

Standort	Bern	Basel	Zürich	St. Gallen	Opfikon
Strahlung [kWh/m ² /Jahr]	1'164	1'133	1'112	1'091	1'113

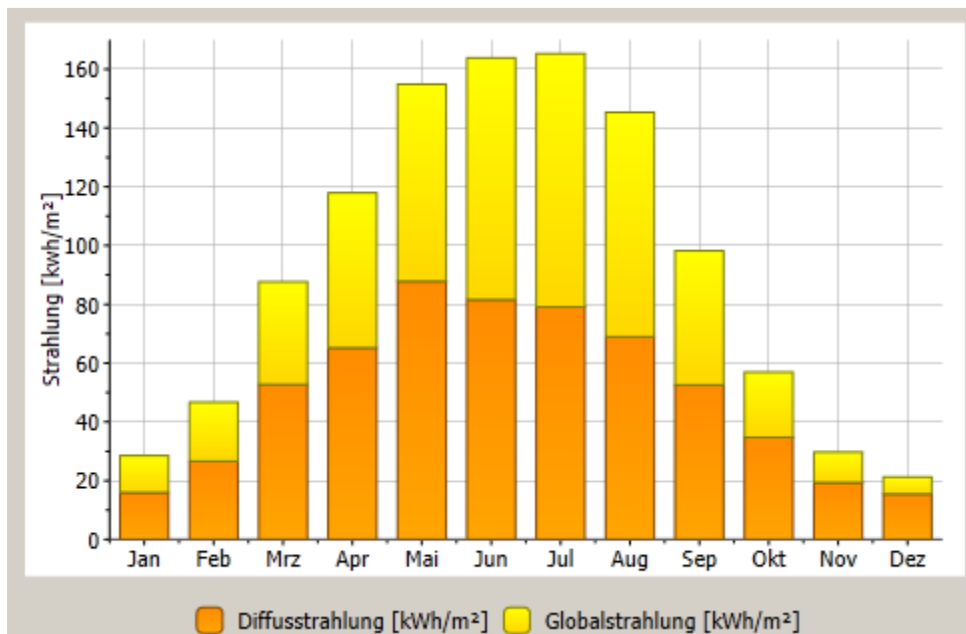


Abbildung 5: Anteil der Diffusstrahlung (orange) an der Globalstrahlung (ganzer Balken orange + gelb) und Aufteilung auf die einzelnen Monate für den Standort Opfikon. Daten: *meteonorm*.

In einem zweiten Schritt wurde für alle Rasterpunkte innerhalb der Gebäudegrundrisse die Einstrahlung unter Berücksichtigung der entsprechenden Ausrichtung, Neigung und Horizontlinie berechnet.

Die Auswirkung des Horizonts auf die Einstrahlung wurde für alle Rasterpunkte innerhalb der Gebäudegrundrisse berechnet. Dabei wurden die direkte und die diffuse Strahlung separat ermittelt. Für die direkte Strahlung wurde für jede Stunde ermittelt, ob die Sonnenposition über dem Horizont des Rasterpunkts liegt oder nicht. Falls die Sonne über dem Horizont liegt, wurde die direkte Strahlung in der entsprechenden Stunde berücksichtigt, ansonsten nicht.

Für die diffuse Strahlung war das Vorgehen komplexer. Der reflektierte Anteil der diffusen Strahlung wurde wie von der *meteonorm* berechnet belassen. Für den nicht reflektierten Anteil der diffusen Strahlung wurde zuerst für jede Stunde im Jahr die Einstrahlungsverteilung der diffusen Strahlung über die Himmelshemisphäre gemäss dem Perez-Modell² berechnet (Auflösung 1 Grad; vgl. Abbildung 6, links). Danach wurde ermittelt, welche Teile der Himmelshemisphäre über dem Horizont

² Perez et al., All-weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation. Solar Energie Vol. 50, 1993, pp. 235-245.

liegen und welche darunter (Abbildung 6, Mitte). Anschliessend wurde nur der Anteil der diffusen Strahlung, der über dem Horizont liegt für die Berechnung berücksichtigt (Abbildung 6, rechts).

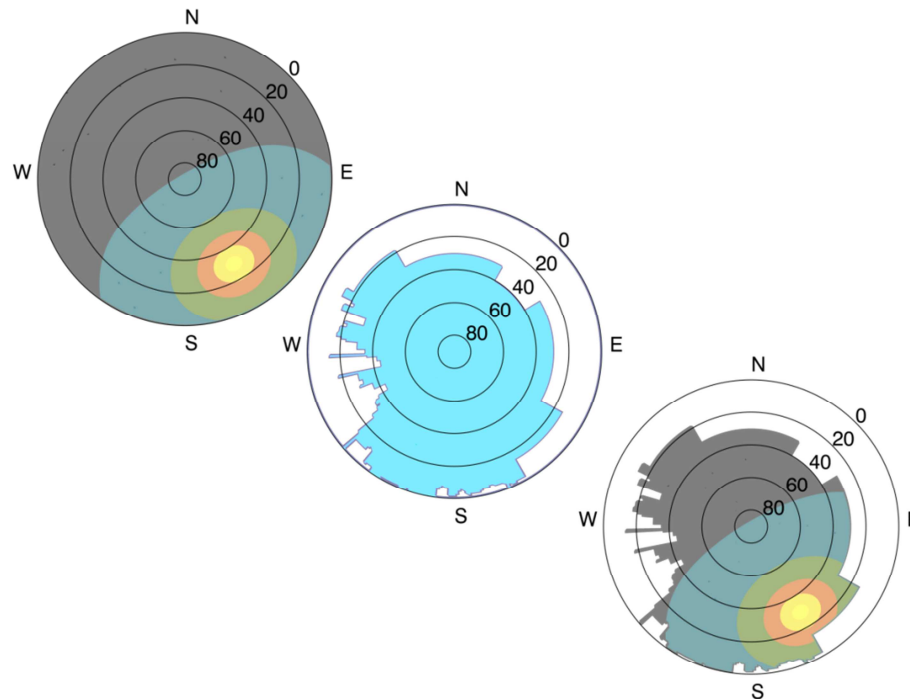


Abbildung 6: Vorgehen bei der Verschattungsanalyse für die diffuse Strahlung: Strahlungsverteilung (links), Horizont (Mitte) und sichtbarer Teil der Strahlungsverteilung (rechts).

Speziell behandelt wurden Flächen mit einer Neigung von 5 Grad und weniger (Flachdächer). Für diese Flächen wurde davon ausgegangen, dass eine Photovoltaikanlage aufgeständert wird. Deshalb wurde für diese Flächen bei der Einstrahlungsberechnung pro Dachfläche die Ausrichtung auf Süden und die Neigung auf 30 Grad gesetzt. Eine Neigung von 30 Grad optimiert für die Stadt Opfikon den möglichen Ertrag pro Fläche. Bei der Potenzialabschätzung für das gesamte Gemeindegebiet muss aber berücksichtigt werden, dass bei aufgeständerten Anlagen maximal die Hälfte der zur Verfügung stehenden Dachfläche ausgenutzt werden kann, ohne durch gegenseitige Abschattung der Module erhebliche Ertragsverluste zu erleiden.

3 Ergebnisse Solarpotenzialanalyse

3.1 Einstrahlungskarte

Als primäres Ergebnis liegt die Einstrahlung pro Quadratmeter als Rasterbild vor (vgl. Abbildung 7). Die Werte geben die jährliche Globalstrahlung pro Quadratmeter an ($\text{kWh/m}^2/\text{Jahr}$). Hier wurde die Einstrahlung auf Basis des direkt aus dem DOM abgeleiteten Gebäudeoberflächenmodells und den dazugehörigen Werten für die Ausrichtung und Neigung berechnet.

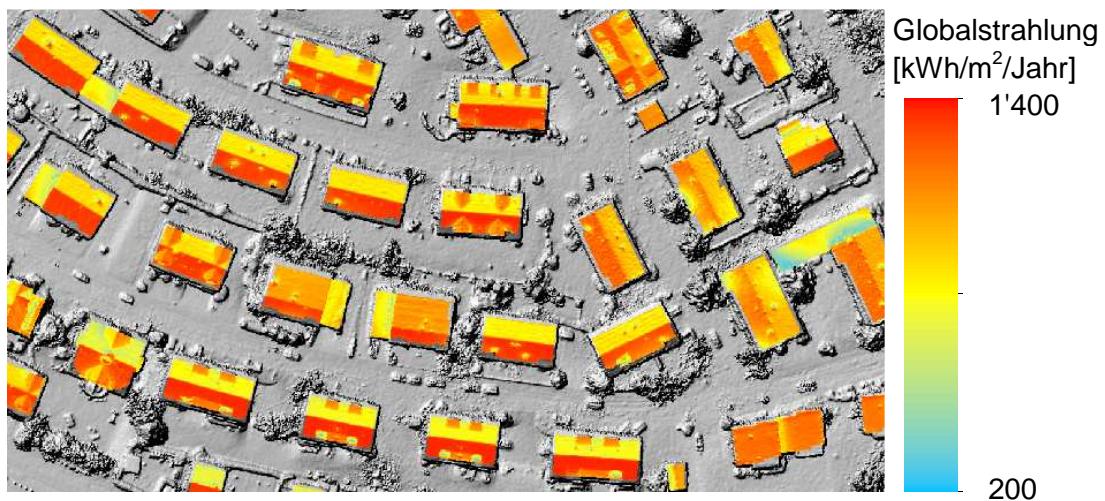


Abbildung 7: Einstrahlung [$\text{kWh/m}^2/\text{Jahr}$] für das Beispielgebiet Bettackerstrasse.

3.2 Solarkataster Version 1 (Gebäude)

Für das Solarkataster Version 1 wird die Einstrahlung auf Basis des direkt aus dem DOM abgeleiteten Gebäudeoberflächenmodells und den dazugehörigen Werten für die Ausrichtung und Neigung berechnet. Die Einstrahlungswerte werden pro Gebäudegrundriss aufsummiert und in einem Feature-Datensatz als Shapefile (solkat_v1, Abbildung 8) aufbereitet. Für die Analyse wird für jede Gesamtgebäudefläche ermittelt, wie gross der Anteil von Rasterpunkten innerhalb der folgenden vier Einstrahlungsklassen ist: 0-800, 800-1'000, 1'000-1'200 und $>1'200$ $\text{kWh/m}^2/\text{Jahr}$. Für jedes Gebäude werden die Parameter gemäss Tabelle 2 angegeben.

Zusätzlich wird jedes Gebäude aufgrund der Einstrahlungswerte einer Eignungsklasse (Eignung) zugeordnet. Die mittlere Einstrahlung ist dafür ein schlechter Gradmesser, da z.B. für Schrägdächer die mittlere Einstrahlung nicht besonders hoch ist, weil Teile des Daches ungünstig ausgerichtet sind. Daher werden die Gebäude nach den in Tabelle 3 festgelegten Kriterien den Eignungsklassen zugeordnet. Diese Einteilung ist jedoch sehr stark vereinfacht. Es kann durchaus vorkommen, dass ein als mässig eingestuftes Gebäude eine Dachfläche beinhaltet, welche sehr gut geeignet ist. Das Solarkataster Version 2 (Dachflächen) vermittelt hier einen viel genaueren Eindruck.

Tabelle 2: Gebäudeparameter

Parameter	Einheit	Beschreibung
Gesamteinstrahlung	[MWh/Jahr]	Gesamte Globalstrahlung für das Haus pro Jahr
Gesamtfläche	[m ²]	Gesamte Gebäudefläche
Fläche sehr gut	[m ²]	Teil der Gebäudefläche mit der Eignungsstufe sehr gut
Fläche gut	[m ²]	Teil der Gebäudefläche mit der Eignungsstufe gut
Eignung	-	vgl. Tabelle 3

Tabelle 3: Eignungsklasse nach Einstrahlung

Eignung	Kriterien
sehr gut	mindestens 30% der Gebäudefläche haben eine mittlere Einstrahlung von mehr als 1'200 kWh/m ² /Jahr
gut	mindestens 50% der Gebäudefläche haben eine mittlere Einstrahlung von mehr als 1'000 kWh/m ² /Jahr
mässig	mindestens 30% der Gebäudefläche haben eine mittlere Einstrahlung von mehr als 1'000 kWh/m ² /Jahr
schlecht	der Rest

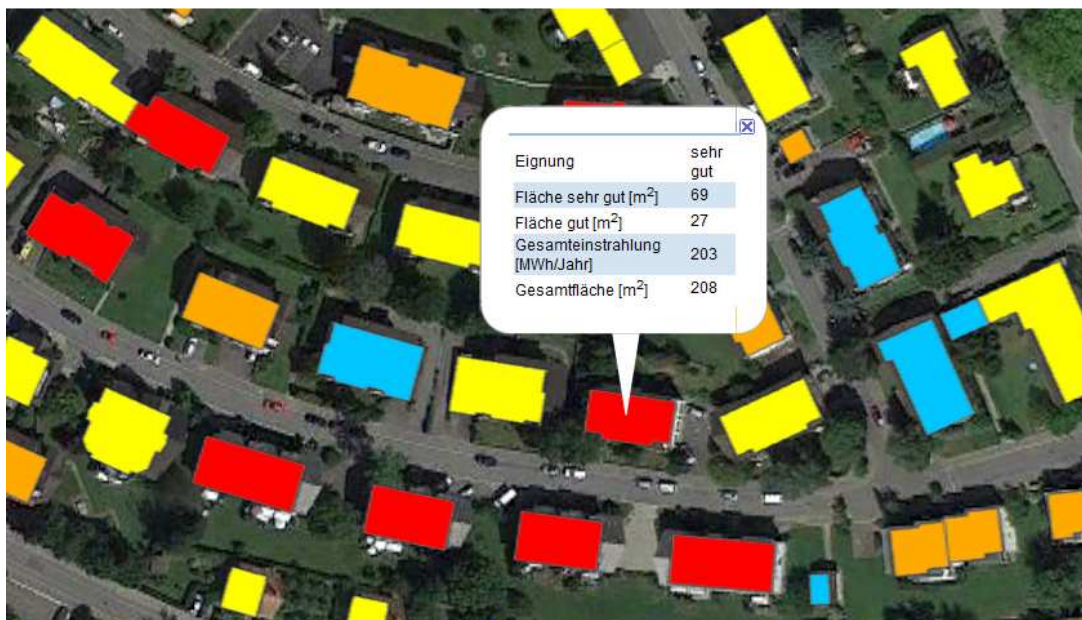


Abbildung 8: Solarkataster Version 1 für das Beispielgebiet Bettackerstrasse mit den Eignungsklassen: Sehr gut, gut, mässig und schlecht (Screenshot aus Google Earth, © 2012 Google Earth).

3.3 Solarkataster Version 2 (Dachflächen)

Im Rahmen der Dachflächenanalyse (vgl. Abschnitt 2.2) wurde innerhalb der erfassten Flächen das Gebäudeoberflächenmodell sowie die Ausrichtung und Neigung homogenisiert. Das Solarkataster Version 2 (Dachflächen) wird auf Basis dieser homogenisierten Werte berechnet. Damit ist gewährleistet, dass Ausrichtung und Neigung innerhalb einer Dachfläche homogen sind. Zudem wird dadurch ein allfälliger falscher Horizont durch eine Inhomogenität des DOM eliminiert. Ausserhalb der Dachflächen wird für die Verschattungsanalyse das DOM verwendet. Da die Berechnung des Solarkatasters auf die Bereiche innerhalb der Gebäudegrundrisse beschränkt ist, fehlen allfällige Vordächer im Solarkataster. Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, wurden Dachflächen mit einer Neigung von 5 Grad und weniger (Flachdächer) speziell behandelt. Für diese Flächen wurde davon ausgegangen, dass eine Photovoltaikanlage aufgeständert wird. Deshalb wurde für diese Flächen bei der Einstrahlungsberechnung pro Dachfläche die Ausrichtung auf Süden und die Neigung auf 30 Grad gesetzt.

Das Ergebnis ist ein Feature-Dataset mit 6'850 Dachflächen (Gesamtfläche von 510'690m²). Für jede Dachfläche sind die in Tabelle 4 erläuterten Parameter angegeben.

Tabelle 4: Parameter für die Dachflächen.

Parameter	Einheit	Beschreibung
Gesamteinstrahlung	[kWh/Jahr]	Gesamte Einstrahlung für die Dachfläche pro Jahr.
Mittlere Einstrahlung	[kWh/m ² /Jahr]	Mittlere Einstrahlung pro Quadratmeter pro Jahr für die Dachfläche.
Fläche	[m ²]	Totale (geneigte) Fläche einer Dachfläche. Dachteile ausserhalb der Gebäudegrundrisse sind nicht berücksichtigt.
Ausrichtung	Grad	-/+180 = Nord, -90 = Ost, 0 = Süd, 90 = West
Neigung	Grad	0 = flach, 90 = vertikal
Nutzbare Fläche	[m ²]	Es handelt sich dabei um eine maximal nutzbare Fläche. Einschränkungen durch Dachfenster etc. sind nicht berücksichtigt. Bei Schrägdächern identisch mit dem Parameter Fläche. Bei Flachdächern ist aufgrund der aufgeständerten Anlage nur 50% der Fläche nutzbar.
Elektrischer Ertrag	[kWh/Jahr]	Auf der nutzbaren Fläche erzielbarer elektrischer Ertrag (vgl. Abschnitt 3.4).
Installierbare PV-Leistung	[kWp]	Auf der nutzbaren Fläche installierbare Photovoltaik-Leistung (vgl. Abschnitt 3.5).
Thermischer Ertrag	[kWh]	Auf der nutzbaren Fläche erzielbarer thermischer Ertrag (vgl. Abschnitt 3.6).
Eignung	-	vgl. Tabelle 5

Jede Dachfläche wurde aufgrund der mittleren Einstrahlung einer Eignungsklasse (Eignung) zugeordnet. Die Einteilung in die Eignungsklassen erfolgte gemäss Tabelle 5. Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt aus dem Solarkataster und in Tabelle 6 sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Als Lesebeispiel: von den insgesamt 6'850 Dachflächen sind 2'308 Dachflächen gut geeignet. Die Summe der Fläche der gut geeigneten Dachflächen beträgt 174'921 m², was 34% der Gesamtfläche aller Dachflächen entspricht.

Tabelle 5: Eignungsklassen gemäss der mittleren Einstrahlung.

Eignung	Kriterien
sehr gut	mittlere Einstrahlung grösser als 1'200 kWh/m ² /Jahr
gut	mittlere Einstrahlung grösser als 1'000 kWh/m ² /Jahr
mässig	mittlere Einstrahlung grösser als 800 kWh/m ² /Jahr
schlecht	mittlere Einstrahlung kleiner als 800 kWh/m ² /Jahr

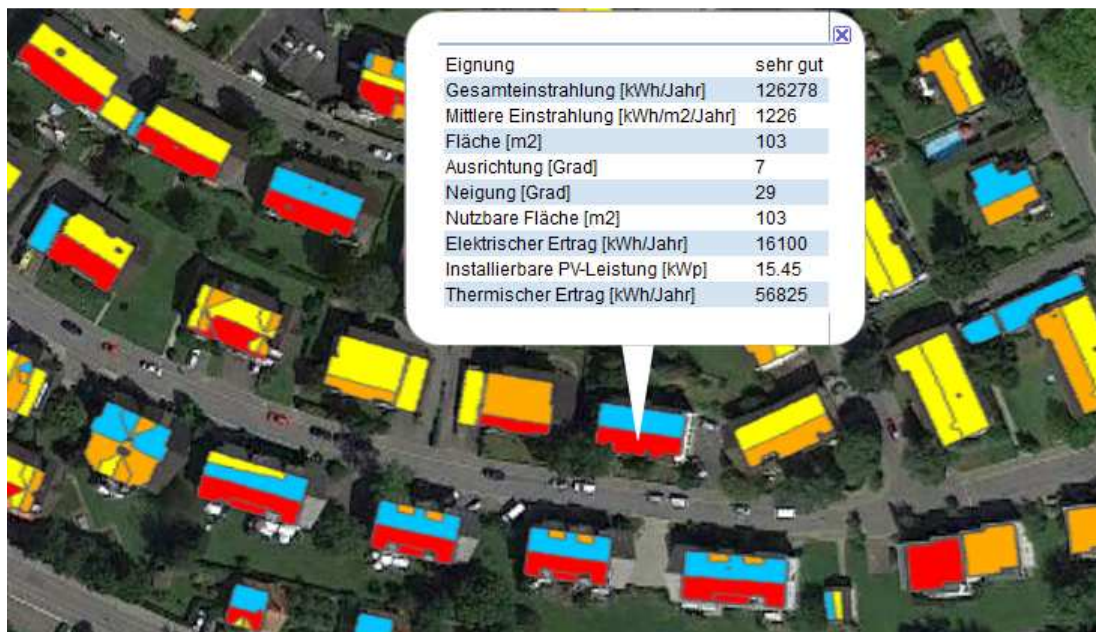


Abbildung 9: Solarkataster für das Beispielgebiet Bettackerstrasse mit den Eignungsklassen: Sehr gut, gut, mässig und schlecht (Screenshot aus Google Earth, © 2012 Google Earth).

Von Interesse ist auch, wie sich die Fläche in den einzelnen Eignungsklassen auf die verschiedenen Dachgrössen aufteilt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Als Lesebeispiel: die Gesamtfläche aller Dachflächen die zwischen 11 und 100 m² gross und gut geeignet sind beträgt 59'427 m².

Tabelle 6: Anzahl Dachflächen und Aufteilung in Schräg- und Flachdächer pro Eignungsklasse.

Eignung	Anzahl	Fläche [m ²]	Fläche Schrägdächer [m ²]	Fläche Flachdächer [m ²]	Anteil Gesamtfläche [m ²]
sehr gut	1'127	169'308	20'167	149'141	33%
gut	2'308	174'921	86'592	88'329	34%
mässig	1'797	112'592	86'133	26'459	22%
schlecht	1'618	53'869	44'348	9'521	11%
Total	6'850	510'690	237'240	273'450	

Es zeigt sich, dass der Anteil der guten und sehr guten Dachflächen bei grossen Dächern überproportional ist. Das hängt zu einem Teil damit zusammen, dass grosse und insbesondere sehr grosse Dachflächen häufiger Flachdächer sind, für die von aufgeständerten und nach Süden ausgerichteten Photovoltaikanlagen ausgegangen wurde. Zudem sind grosse Dachflächen sehr selten stark verschattet. Weiter zeigen die Ergebnisse, dass nur 1,8% (9'132 m²) der Gesamtfläche auf kleine Dachflächen von 10 m² und weniger entfällt.

Tabelle 7: Aufteilung der Dachflächen in Grössenkategorien pro Eignungsklasse.

Eignung	0 - 10 [m ²]	11 - 100 [m ²]	101 - 1000 [m ²]	> 1000 [m ²]
sehr gut	928	23'143	117'556	27'681
gut	2'959	59'427	100'354	12'181
mässig	2'011	51'191	54'225	5'165
schlecht	3'234	33'965	16'670	0
Total	9'132	167'726	288'805	45'027

3.4 Umrechnung in elektrische Energie

Der auf einer Fläche mit einer gegebenen Einstrahlung erzielbare Ertrag einer Photovoltaikanlage hängt stark vom eingesetzten Modultyp ab (vgl. Tabelle 8). Der für Module angegebene Wirkungsgrad bezieht sich immer auf Standard-Testbedingungen (25°C Zelltemperatur und Einstrahlungsstärke von 1'000 W/m²). Der Wirkungsgrad ist temperaturabhängig und nimmt z.B. für kristalline Siliziumzellen mit rund 0.05% pro Grad ab. Wir im Folgenden von einem mittleren Modulwirkungsgrad von 15% aus. Ein solcher ist mit den heute am häufigsten verwendeten Siliziumzellen problemlos erreichbar.

Tabelle 8: Modulwirkungsgrad bei Standard-Testbedingungen³.

Material	Modulwirkungsgrad
Monokristallines Silizium	11% bis 19.5%
Polykristallines Silizium	10% bis 16%
Amorphes Silizium	3% bis 7.5%
Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)	7.5% bis 11.5%

Neben dem Modulwirkungsgrad muss weiter der Systemwirkungsgrad (performance ratio) berücksichtigt werden. Der Systemwirkungsgrad berücksichtigt alle Verluste in der Anlage (z.B. Wechselrichter, Temperatur-Abhängigkeit des Modulwirkungsgrades). Durch die Verbesserungen insbesondere bei den Wechselrichtern kann heute von einem Systemwirkungsgrad von 85% ausgegangen werden.

Insgesamt ergibt dies für die Umrechnung des Einstrahlungspotenzials in das Potenzial für elektrische Energie einen Faktor von 12.75% ($85\% \cdot 15\%$).

Für Flachdächer wurde bei der Einstrahlungsberechnung von einer aufgeständerten und nach Süden ausgerichteten Anlage ausgegangen. In der Praxis kann bei einer aufgeständerten Anlage nur rund die Hälfte der Fläche genutzt werden, ohne durch gegenseitige Abschattung der Module erhebliche Ertragsverluste zu erleiden. Somit kann in der Praxis nur die Hälfte des angegebenen Ertrages erzielt werden.

3.5 Installierbare elektrische Leistung pro Fläche

Die Leistung von Photovoltaikanlagen wird in der Regel in Kilowattpeak [kWp] angegeben. Dabei handelt es sich um die Leistung der Anlage bei Standard-Testbedingungen (25°C Zelltemperatur und Einstrahlungsstärke von 1000 W/m²). Die pro Quadratmeter installierbare Leistung in [kWp] ergibt sich aus dem Modulwirkungsgrad. Liegt dieser z.B. bei 15%, so kann pro Quadratmeter eine Leistung von $150 \text{ Wp/m}^2 = 0.15 \cdot 1000 \text{ W/m}^2$ erreicht werden.

Für eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 1 kWp wird somit eine Fläche von rund 7 m² benötigt.

3.6 Solarthermische Nutzung (Sonnenkollektoren)

Solarthermische Anlagen weisen generell einen höheren Wirkungsgrad als Photovoltaikanlagen auf, wobei allerdings das Produkt einer solarthermischen Anlage Wärmeenergie ist und bei einer Photovoltaikanlage höherwertige elektrische Energie erzeugt wird. Ob eine Dachfläche besser für eine Photovoltaikanlage oder für eine solarthermische Anlage (Heizung, Warmwasser) genutzt wird, hängt von den

³ kommerziell erhältliche Module. Quelle: Swisssolar/Häberlin 2010.

Gegebenheiten im Einzelfall (bereits installiertes Heizsystem, Wärmebedarf, zur Verfügung stehender Platz für Wärmespeicher, etc.) ab. Es lohnt sich, dabei die Beratung durch eine Fachperson in Anspruch zu nehmen.

Der erzielbare Wirkungsgrad bei der Umwandlung der Einstrahlung (im Solarkataster für jede Dachfläche angegeben) in Wärmeenergie hängt stark von der Auslegung des solarthermischen Systems und dem Verwendungszweck ab. Mögliche Nutzungen einer solarthermischen Anlage sind Wasservorwärmung, Erzeugung von Brauchwarmwasser und Heizungsunterstützung. In Tabelle 9 sind typische Wirkungsgrade von solarthermischen Anlagen für diese drei Verwendungszwecke angegeben. Die Angaben basieren auf Testberichten des Instituts für Solartechnik an der Hochschule für Technik in Rapperswil⁴. Für die Berechnung des thermischen Ertrags im Solarkataster wurde ein Wirkungsgrad von 45% verwendet.

Tabelle 9: Typische Wirkungsgrade von Sonnenkollektoren.

Verwendungszweck	Wirkungsgrad
Wasservorwärmung	50 % - 75 %
Brauchwarmwasser	40 % - 60 %
Heizungsunterstützung	25 % - 50 %

3.7 Photovoltaik- und Solarthermie-Potenzial für die Stadt Opfikon

Das Vorgehen zur Potenzialberechnung ist analog einer von *METEOTEST* für das Bundesamt für Umwelt BAFU erstellten Studie zum Solarenergiepotenzial für die gesamte Schweiz⁵.

Für die solarthermische Nutzung wird eine Fläche von 2 m² pro Einwohner reserviert⁶, was einer Fläche von rund 32'000 m² und einem Anteil von 9% der Fläche von gut und sehr gut geeigneten Dachflächen (vgl. Tabelle 6) entspricht.

Die Gesamteinstrahlung auf alle Dachflächen beträgt für die Stadt Opfikon 545 GWh/Jahr. Könnte die gesamte Strahlung mit einem mittleren Gesamtwirkungsgrad der Photovoltaikanlagen von 12.75% genutzt werden (vgl. Abschnitt 3.4), ergäbe sich eine Stromproduktion von 69 GWh/Jahr. Wird weiter berücksichtigt, dass bei Flachdächern wegen den in der Strahlungsberechnung angenommenen aufgestän-

⁴ Die Werte basieren auf einer Simulation mit Polysun (<http://www.polysun.ch>). Es wurde dabei von einer Einstrahlung von 1'200 kWh/m²/Jahr in die Kollektorebene und einer 45° geneigten Anlage ausgegangen. Mehr Details unter <http://www.solarenergy.ch>.

⁵ Energiestrategie 2050: Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie. Erstellt durch *METEOTEST* im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU (2012). Abrufbar unter: <http://www.bafu.admin.ch/energie/index.html?lang=de>

⁶ Ziel der Swissolar bis 2035: Abrufbar unter http://www.swissolar.ch/fileadmin/files/swissolar/medientexte/120125_MM_Tagung_Solarw%C3%A4rme_Schweiz_2012.pdf. 2 m² Fläche pro Kopf sollte auch aufgrund der technischen Machbarkeit (insbesondere Grösse der Warmwasserspeicher) gut umsetzbar sein.

dernten Anlagen nur die Hälfte der Fläche genutzt werden kann, ergibt sich eine Stromproduktion von 49 GWh/Jahr. Dieser Wert kann als technisches Potenzial der Photovoltaiknutzung auf den Dachflächen in der Stadt Opfikon bezeichnet werden. Werden nur die gut und sehr gut geeigneten Dachflächen berücksichtigt, beträgt das Potenzial 34 GWh/Jahr. Dieser Wert kann als wirtschaftliches Potenzial bezeichnet werden.

Wegen zusätzlicher störender Aufbauten (Ausparung um Kamine, Dachfenster, etc.), die im Solarkataster nicht enthalten sind, reduziert sich das wirtschaftliche Potenzial erfahrungsgemäss um rund 20%. Aufgrund von Schutzobjekten reduziert sich das Potenzial schätzungsweise um weitere 5%. Weiter werden wie erwähnt 9% der Fläche von gut und sehr gut geeigneten Dachflächen für solarthermische Nutzung reserviert. Unter Berücksichtigung dieser Effekte verbleiben somit 66% des wirtschaftlichen Potenzials, was 22 GWh/Jahr entspricht.

Welcher Teil dieses Potenzials genutzt wird, ist eine Frage der politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Wir gehen hier davon aus, dass etwa 50% des wirtschaftlichen Potenzials von 22 GWh/Jahr (unter Berücksichtigung von Aufbauten, Schutzobjekten und solarthermischer Nutzung) tatsächlich genutzt werden. Diese Annahme ist als eine erste Schätzung zu betrachten und somit mit grossen Unsicherheiten behaftet. Ausgehend von dieser Annahme liegt das realistische Potenzial somit bei 11 GWh/Jahr.