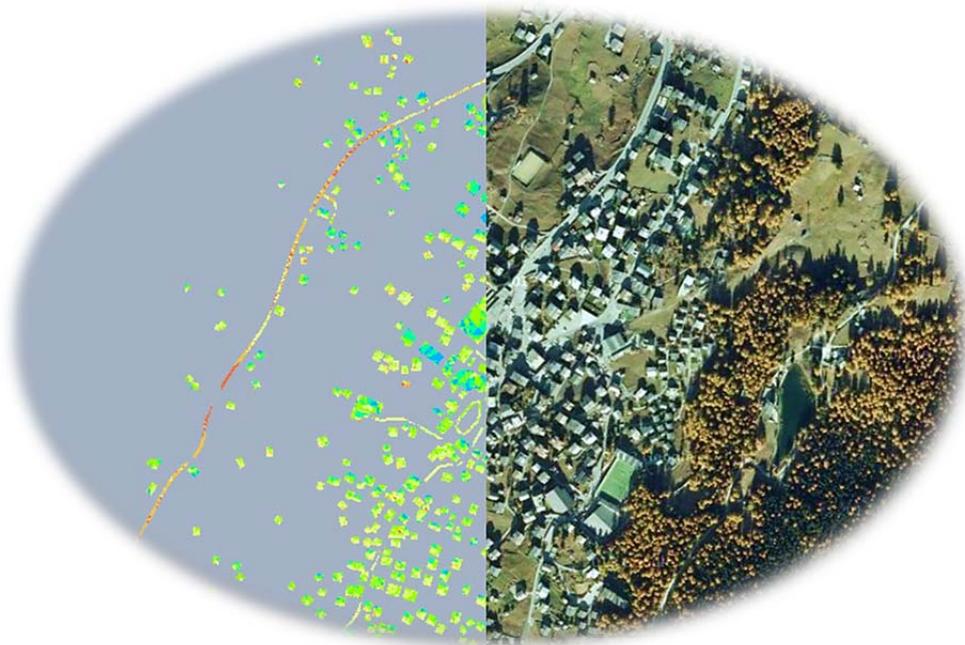


Photovoltaik in den Schweizer Alpen

Eine Teillösung für eine erfolgreiche Energiewende?



Bachelorarbeit FS/HS 2013

Verfasser: **Felix Weber**

Betreuerin: **Sarah Salvini**

Co-Betreuer: **Dr. Rudolf Rechsteiner**

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

DUSYS

Department of
Environmental Systems Science



Zürich, 31. Januar 2014

Titelblatt: Quellen der Bilder

Google Maps (2013). <https://maps.google.com>. Zugriff: 20.11.2013

hikr.org (2013). <http://www.hikr.org/gallery/photo68634.html>. Zugriff: 20.11.2013

Klima sucht Schutz (2013). <http://www.klima-sucht-schutz.de/energiesparen/energiespar-spezial/solar-spezial/beitrag/article/aenderung-der-solarstromverguetung.html>. Zugriff: 20.11.2013.

Solution by Innovation (2013). <http://www.sbi.ch/ihrwegzuuns.html>. Zugriff: 20.11.2013

WSL und SLF (2013). http://www.wslf.ch/info/veranstaltungen/veranstaltungskalender/25_ander matt/fototour/index_DE. Zugriff: 20.11.2013.

Gemeinde Zizers (2013). <http://www.zizers.ch/index.php?id=1060>. Zugriff: 20.11.2013.

Alternatives Wandern (2013). <http://www.alternatives-wandern.ch/bergseen/graubuenden.htm>. Zugriff: 20.11.2013.

Zusammenfassung

Die Arbeit „Photovoltaikanlagen in den Schweizer Alpen: Eine Teillösung für eine erfolgreiche Energiewende?“ befasst sich mit dem Potential von Photovoltaik im alpinen Raum. Die wichtigsten Fragestellungen lauten: wie gross ist das Potential von Photovoltaik im alpinen Raum und welche Nutzungsszenarien sind für das Potential von Bedeutung? Weiter geht es darum, welchen Beitrag die Photovoltaik zur Energiewende beisteuern kann, wie genau ein grob angepasstes Modell in einem Geoinformationssystem (GIS) der Realität entsprechen kann, und wie ein solches Modell verifiziert werden kann.

Um diese Fragen zu beantworten, wurden zwei Arbeitsschritte durchgeführt: eine Literaturrecherche zur Erörterung von Technologie, Ausgangslage und Nutzungskonflikten von Photovoltaik im alpinen Raum und eine Potentialabschätzung anhand von fünf Nutzungsszenarien in einem GIS-Modell. Verwendet wurde dafür die Software Esri ArcGIS 10.1. Alle Arbeitsschritte und Resultate beziehen sich auf den definierten alpinen Raum, eine Fläche von 15'353.18 km², welche das Gebiet der Schweiz höher als 1500 m.ü.M. einschliesst.

Das Potential im alpinen Raum gemäss dem Modell beträgt 2'550 Gigawattstunden (GWh), wofür eine Fläche von 26.96 km² gebraucht wird. Diese Fläche wird in vier Szenarien bereitgestellt: Strassenränder, Gebäudeoberflächen, Lawinenverbauungen und Stauseen. Dabei entsprechen die Gebäudeoberflächen und Strassenränder etwa zwei Dritteln des Potentials, während die anderen zwei Szenarien einen zwar kleineren, aber trotzdem relevanten Anteil des Potentials ausmachen. Das fünfte Szenario, die Freiflächen, wurde separat betrachtet, weil dort ein grosses Konfliktpotential besteht und eine Umsetzung des Modells in naher Zukunft nicht realistisch ist. Die Freiflächen würden eine Fläche von 170.36 km² ausmachen und ein Potential von 15'083 GWh ausweisen.

Das Potential von 2'550 GWh entspricht ungefähr 4 % des Elektrizitätsverbrauchs der Schweiz im Jahr 2012 und könnte etwa 82 % der Stromproduktion des KKW Mühleberg kompensieren. Bezüglich der gesetzten Ziele des Bundesrates in der Energiestrategie 2050 oder der Photovoltaikziele von Swissolar könnte Photovoltaik aus den Alpen ungefähr einen Fünftel beisteuern.

Diese Resultate zeigen, dass Photovoltaik in den Schweizer Alpen einen Beitrag an die Energiewende leisten kann, aber dass zusätzliche Massnahmen nötig sind. In einer dezentralisierten und lokalen Zukunft (kleine Kraftwerke an vielen verschiedenen Orten) wird das Stromsystem anders aussehen, und kleine, erneuerbare Energiequellen werden sehr gut darauf ausgerichtet sein. Ausserdem müssen zukünftige Koppelungsmöglichkeiten der Photovoltaik mit anderen Projekten (zum Beispiel CO₂-Senkungsmassnahmen) im Auge behalten werden.

Zusammengefasst sollte Photovoltaik in den Alpen als Pioniertechnik umgesetzt werden muss, damit wichtige Erfahrungen gesammelt werden können und die Energiewende eingeläutet wird.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	I
INHALTSVERZEICHNIS	II
1. EINLEITUNG	1
2. MATERIAL UND METHODEN	2
2.1. MATERIAL	2
2.1.1 DATENSÄTZE IN ESRI ARCGIS 10.1	2
2.2. METHODEN	3
2.3. BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	3
2.3.1 PHOTOVOLTAIK	3
2.3.2 PHOTOVOLTAIKANLAGEN - VON DER SOLARZELLE ZUM SOLARSYSTEM	4
2.3.3 SONNENEINSTRALUNG (GLOBALSTRAHLUNG)	4
2.3.4 GLOBALBESTRAHLUNGSSTÄRKE	4
2.3.5 STRALUNGSSUMME	4
2.3.6 SPITZENLEISTUNG	4
2.3.7 FLÄCHENNUTZUNGSGRAD	5
2.3.8 SOLARZELLENWIRKUNGSGRAD	5
2.3.9 SOLARMODULWIRKUNGSGRAD	5
2.3.10 NUTZUNGSGRAD	5
2.3.11 WECHSELRICHTER	5
2.3.12 POTENTIAL	5
2.3.13 NEUE ERNEUERBARE ENERGIEN	6
3. PHOTOVOLTAIK	7
3.1. FUNKTIONSWEISE VON SOLARZELLEN: HALBLEITER	7
3.2. VERSCHIEDENE SOLARZELLEN IM VERGLEICH	8
3.2.1 KRISTALLINE SILIZIUM-SOLARZELLE	8
3.2.2 DÜNNSCICHT-SOLARZELLE	8
3.2.3 BIFACIAL-SOLARZELLEN	10
3.2.4 ÜBERSICHTSTABELLE: SOLARZELLENTYPEN	10
3.2.5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND BEMERKUNGEN	11
3.3. VOR- UND NACHTEILE VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN IN ALPINEN REGIONEN	12
3.4. RISIKEN UND GEFAHREN	14
3.5. NACHFÜHRUNG	14
3.5.1 AUFWAND UND STEIGERUNG DES ERTRAGS	14
3.5.2 SCHNEEBEFALL	15
4. AUSGANGSLAGE FÜR PHOTOVOLTAIK IM ALPINEN RAUM	16
4.1. DEFINITION DES ALPINEN RAUMES	16
4.2. BESTEHENDE ALPINE PHOTOVOLTAIKANLAGEN IN DER SCHWEIZ	18
4.2.1 ECKDATEN VON BEISPIELANLAGEN IM VERGLEICH	19

4.2.2	ZUSAMMENFASSUNG DER ECKDATEN	20
4.2.3	AUSPRÄGUNG VON ALPINEN MERKMALEN UND AUFTRETENDE PROBLEME.....	20
4.2.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN	21
4.3.	KOSTENDECKENDE EINSPEISEVERGÜTUNG (KEV)	22
4.4.	NUTZUNGSKONFLIKTE	24
4.4.1	GESETZLICHE GRUNDLAGEN: RAUMPLANUNGSGESETZ (RPG)	25
4.4.2	NATUR- UND UMWELTSCHUTZ	25
4.4.3	LANDWIRTSCHAFT	25
4.4.4	KULTURSCHUTZ.....	26
4.4.5	TOURISMUS, SPORT UND ANDERE AKTIVITÄTEN	26
4.4.6	ANWOHNER, BEVÖLKERUNG	26
4.4.7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	27
5.	POLITISCHE SITUATION: DIE ENERGIEWENDE IN DER SCHWEIZ.....	28
6.	NUTZUNGSSZENARIEN.....	30
6.1.	AUSWAHL DER SZENARIEN	30
6.2.	SZENARIO 1: STRASSEN.....	31
6.3.	SZENARIO 2: GEBÄUDEOBERFLÄCHEN.....	31
6.4.	SZENARIO 3: FREIFLÄCHEN.....	32
6.5.	SZENARIO 4: LAWINENVERBAUUNGEN	32
6.6.	SZENARIO 5: STAUSEEN	33
7.	EIGNUNGSANALYSE.....	34
7.1.	MODELL: METHODIK UND UNGENAUIGKEITEN	34
7.1.1	STRASSEN	35
7.1.2	GEBÄUDEOBERFLÄCHEN	36
7.1.3	FREIFLÄCHEN.....	37
7.1.4	LAWINENVERBAUUNGEN	37
7.1.5	STAUSEEN.....	38
7.1.6	GESAMTER ALPINER RAUM.....	38
7.2.	RESULTATE	39
7.2.1	GESAMTER ALPINER RAUM.....	39
7.2.2	NUTZUNGSSZENARIO FREIFLÄCHEN	44
7.2.3	VERGLEICH DER NUTZUNGSSZENARIEN	45
7.3.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND BEMERKUNGEN	45
8.	VERIFIZIERUNG.....	47
8.1.	AUSWAHL DER GEMEINDEN	47
8.2.	BESCHREIBUNG DER AUSGEWÄHLTEN GEMEINDEN	48
8.2.1	GEMEINDE GRÄCHEN (VS).....	49
8.2.2	GEMEINDE BRIENZ (BE)	49
8.2.3	GEMEINDE CASTI-WERGENSTEIN (GR).....	50
8.2.4	GEMEINDE MULEGNS (GR).....	50
8.3.	ÄNDERUNGEN AN DEN SZENARIEN: METHODEN UND UNGENAUIGKEITEN	51

8.3.1	ÄNDERUNG DER GLOBALSTRAHLUNGSDATEN	51
8.3.2	GESAMTE GEMEINDEN	54
8.3.3	NUTZUNGSSZENARIO FREIFLÄCHEN	58
8.4.	RESULTATE	59
8.4.1	GEMEINDE GRÄCHEN	59
8.4.2	GEMEINDE BRIENZ	64
8.4.3	GEMEINDE CASTI-WERGENSTEIN	68
8.4.4	GEMEINDE MULEGNS	71
8.4.5	VERGLEICH DER VERIFIZIERUNGSGEMEINDEN	74
8.4.6	VERGLEICH DER MITTLEREN GLOBALSTRAHLUNGSWERTE DER SZENARIEN	76
8.4.7	UNTERSCHIEDE ZWISCHEN VERIFIZIERUNG UND MODELL.....	76
8.5.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND BEMERKUNGEN	79
8.5.1	AUSWAHL DER GEMEINDEN UND METHODE	79
8.5.2	VERGLEICH DER RESULTATE FÜR DIE VIER GEMEINDEN	79
8.5.3	VERGLEICH DES MODELLS MIT DER VERIFIZIERUNG	81
9.	ANPASSUNG DES MODELLS ANHAND DER VERIFIZIERUNG	84
10.	TECHNISCHES POTENTIAL DER PHOTOVOLTAIK IM ALPINEN RAUM.....	85
11.	DISKUSSION	89
11.1.	PHOTOVOLTAIKANLAGEN IN DEN ALPEN	89
11.2.	MODELL, VERIFIZIERUNG UND ANPASSUNG DES MODELLS	89
11.3.	POTENTIAL IM ALPINEN RAUM	90
11.4.	POTENTIAL FÜR DIE AUSGEWÄHLTEN VERIFIZIERUNGSGEMEINDEN.....	92
11.5.	DIE ZUKUNFT.....	92
11.6.	FAZIT.....	94
12.	LITERATURVERZEICHNIS	95
13.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	99
14.	TABELLENVERZEICHNIS.....	101
15.	ANHANG	A