



SolarScan

Großflächige Ableitung des Solarpotenzials von
Dachflächen auf Basis von Laserscanning-Daten

VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

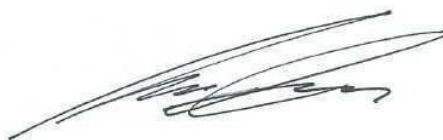
Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Energie der Zukunft“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Abstract	3
1 Einleitung	4
2 Inhaltliche Darstellung	6
2.1 Laserscanning-Datensätze	6
2.2 Klassifikation der Dachflächen aus Laserscanning-Daten	7
2.2.1 Vektorbasierter Ansatz	7
2.2.2 Rasterbasierter Ansatz	11
2.3 Berechnung des Solarpotenzials	13
2.3.1 Vektorbasierter Ansatz	13
2.3.2 Rasterbasierter Ansatz	15
3 Ergebnisse	20
3.1 Solarpotenzialanalysen des vektorbasierten Ansatzes	20
3.2 Solarpotenzialanalysen des rasterbasierten Ansatzes	21
4 Schlussfolgerungen	23
5 Ausblick und Empfehlungen	24
6 Literatur	26

Kurzfassung

Ausgangssituation

Die zurzeit verfügbaren großräumigen (z.B. landesweiten) Besonnungs- und Globalstrahlungsmodellierungen berücksichtigen die potenzielle Besonnung an einem Ort auf Basis von Geländemodellen einer Auflösung von bestenfalls 10 x 10 Metern.

Zielsetzungen

Mit den im Rahmen des Projektes SolarScan entwickelten Solarenergie-Potenzialmodellierungen wird es durch die Verwendung von flugzeuggestützten Laserscanning-Daten möglich sein, für jedes einzelne Hausdach innerhalb des Rheintales in Vorarlberg die tatsächlich mögliche Besonnung und das daran geknüpfte Energiepotenzial zu berechnen und abzurufen.

Methodische Vorgehensweise

Wegweisend in der Umsetzung des Projektes ist die Verwendung von Laserscanning-Daten als höchstgenaue Datengrundlage sowie die Entwicklung von Algorithmen und Verfahren seitens ihrer Auswertung. Durch den Aufbau eines speziellen Laserdaten-Informationssystems in welchem die Laserscanning-Daten in einer speziell auf Laserdaten abgestimmten Datenbank abgespeichert werden, wird eine umfassende Analyse dieser Daten in ihrer Vollabdeckung möglich. In einem ersten Schritt werden aus den Datensätzen über objektorientierte Klassifikationsansätze die Dächer der Gebäude extrahiert. Diese Klassifikation wird auf Basis der Rohdatensätze (Punktwolke) für lokale Analysen und im Raster für großflächige Analysen durchgeführt. Die hochgenauen geometrischen Informationen der Laserscanning-Daten bleiben somit während des gesamten Klassifikationsprozesses erhalten. Die extrahierten Dachflächen werden als eigenständiger Informationslayer abgespeichert. Die Berechnung des Solarpotenzials für die extrahierten Dachflächen erfolgt anschließend in Abhängigkeit der Ausrichtung (Neigung und Exposition) der einzelnen Dachflächen, wobei die Einstrahlung als Summe der direkten Strahlung und der diffusen Himmelsstrahlung gerechnet wird. Die Berechnung wird unter Annahme einer Standardatmosphäre durchgeführt und später eine Bewölkungssituation anhand von meteorologischen Messwerten berücksichtigt. Dabei wird in Abhängigkeit der Jahres- und Uhrzeit der Sonnenstand für die gegebene geographische Länge und Breite ermittelt und so die Abweichung der Sonneneinstrahlung zur der Flächennormalen des Hausdachs errechnet. Dabei werden sowohl die topographische als auch die objektbasierte Verschattung durch Bäume oder andere Objekte berücksichtigt.

Ergebnisse

Als Ergebnis der Berechnungen steht für jedes Hausdach die potenzielle Jahressumme der verfügbaren Solarenergie mit Berücksichtigung atmosphärischer Bedingungen zur Verfügung. Die Werte können außerdem für jeden Tag im Jahr separat gespeichert werden und erlauben so eine detaillierte und jahreszeitenabhängige Abschätzung des Solarpotenzials. Die Ergebnisse selbst sind einerseits als

digitale Karten visualisierbar, andererseits als statistische Graphiken interpretierbar und abrufbar. Sie können bei Energieagenturen, Gemeinden, Bezirksverwaltungen oder Landesregierungen als Informationslayer in geographischen Informationssystemen vorgehalten werden, oder über Webserver am Internet als Informationsdienste frei oder kostenpflichtig verfügbar gemacht werden. Das im gegenständlichen Projekt berechnete Solarpotential wurde in Form von digitalen GIS-Karten und als Web-Service bei der Vorarlberger Landesregierung verfügbar gemacht.

Abstract

Motivation

The currently available large coverage modelling approaches for solar irradiation build on medium resolution digital elevation models (e.g. 10x10m gridsize) only.

Goals

With the algorithms, methods and datasets used in the project SolarScan it will be possible to calculate the real solar irradiation and the accompanying solar potential for each building roof of the Province of Vorarlberg (test site).

Methods

New in this context is the use of airborne laserscanning-data (ALS) as very high resolution data basis as well as the development of software instruments for its analysis. By setting-up an information system for laserscanning data in which these data is stored in a suited data base structure, a large coverage data analysis is made possible. In a first step building roofs are extracted from the laserscanning data via object oriented classification approaches and stored as separate GIS-layer.

The roof planes are detected within the 3D-point cloud (local analyses) and in the raster format (large coverage analyses) by using the geometrical information of the ALS data. The calculation of the solar potential of the extracted roof areas bases on their parameters exposition and slope. The irradiation is calculated as the sum of direct and diffuse radiation – in this stage on the basis of a standard atmosphere. Cloud coverage is later integrated based on measurements from meteorological stations. The relation between given geographic longitude and latitude parameters and the daily as well as seasonal sun position is respected. Based on this inputs the solar irradiation for the normals of the roof areas is calculated. The topographic shading situation as well as the shadows of buildings and trees is taken into account.

Expected results

The results contain the yearly sum of the available solar energy. The results can also be requested on a daily basis and therefore allow a detailed seasonal calculation of the solar potential. The results are visualised as digital raster maps, as well as on statistics. The information layers can be integrated into geographic information systems of State Governments, regional authorities, communes or energy agencies or accessed on the internet via free or liable to pay cost web-services. In the frame of the current project the results are integrated as digital maps in a web-service for the Province of Vorarlberg.

1 Einleitung

Die zurzeit verfügbaren Modelle zur Berechnung des Solarpotenzials an einem Ort basieren sehr oft auf photogrammetrisch erfassten digitalen Geländemodellen mit einer Bodenauflösung von bestenfalls 10 x 10 Metern. Diese digitalen Geländemodelle enthalten keinerlei Information über die sich auf dem Gelände befindlichen Objekte und Strukturen (z.B. Gebäude, Vegetation), sondern geben lediglich eine Abbild der Geländeinformation wieder. Eine Einbeziehung von Klein-Strukturen (Gebäude, Vegetation etc.) in die Berechnungen des Solarpotenzials an einem Ort ist somit gar nicht möglich. Einzelne Dachflächen und deren Neigungs- und Expositionseigenschaften lassen sich nur mit Hilfe hochgenauer digitaler Oberflächenmodelle, welche die volle Gelände und Oberflächeninformation enthalten, extrahieren. Damit kann auch eine mögliche Abschattung der Dachflächen durch angrenzende Vegetation bzw. Gebäude berücksichtigt werden.

Mit Hilfe von flugzeuggestützten (engl. airborne) Laserscanning (ALS) Technologien lassen sich Kleinstrukturen auf der Erdoberfläche erfassen und hochgenaue digitale Oberflächenmodelle ableiten, die als Datengrundlage zur großflächigen Modellierung des Solarpotenzials dienen. Beim ALS Verfahren wird die Objektoberfläche mittels eines an einem Flugzeug installierten Laser abgetastet. Aus der Laufzeit des Impulses vom Aussenden bis zum Empfang eines stark gebündelten Laserstrahls kann die Entfernung zwischen Laserscanner und der jeweiligen Objektstelle, an der der Laserstrahl diffus reflektiert wird, ermittelt werden. Bei dieser Technologie spielt ein dynamisches Positionierungs- und Orientierungssystem (POS) bestehend aus einem Satellitenpositionierungssystem (GPS) und einer inertialen Messeinrichtung (IMU) eine entscheidende Rolle. Denn nur so kann die exakte Laserscannerposition und der Stellwinkel des Laserscanners zum Zeitpunkt des Laserschusses ermittelt werden, um eine Umwandlung der vom Laserstrahl getroffenen Objektpunkte von Polarkoordinaten in XYZ-Koordinaten zu gewährleisten. Bei diesem Verfahren werden eine Höhengenaugigkeit von ca. 10-20 cm und eine Bodenauflösung von mindestens einem Punkt pro Quadratmeter erreicht.

Mit den im Rahmen des Projektes *SolarScan* entwickelten Solarenergie-Potenzialmodellierungen ist es durch die Verwendung von ALS Daten möglich, für jedes einzelne Hausdach innerhalb des NUTS 3 Gebietes Rheintal-Bodenseegebiet des Landes Vorarlberg (Untersuchungsgebiet) die potenzielle Besonnung und das daran geknüpfte Energiepotenzial (Solarpotenzial) zu berechnen und abzurufen. Unter Solarpotenzial wird in diesem Zusammenhang der potenzielle kurzweilige solare Strahlungsgenuss einer Fläche unter Berücksichtigung ihrer Exposition und Neigung und der Verschattung der Fläche durch Objekte im Fern- (=Relief) und Nahbereich (Vegetation, Bebauung) verstanden. Die Herausforderung des Projektes besteht in der Umsetzung eines Verfahrens, das die Anwendung für große Untersuchungsflächen bei kurzen Rechenzeiten ermöglicht. Bei der Prozessierung der großen Untersuchungsflächen ist die Fernwirkung der topographischen Schatten in einer groben Maßstabsebene zu berücksichtigen, ohne dabei die hoch detaillierte Oberflächeninformationen des Laserscanningmodells abzuschwächen. Die Ergebnisse selbst sind einerseits als digitale Karten visualisierbar, andererseits als statistische Graphiken interpretierbar und abrufbar. Sie können bei Energieagenturen, Gemeinden, Bezirksverwaltungen oder Landesregierungen

als Informationslayer in geographischen Informationssystemen vorgehalten werden, oder über Webserver am Internet als Informationsdienste frei oder kostenpflichtig verfügbar gemacht werden

Wegweisend in der Umsetzung des Projektes ist die Verwendung von Laserscanning-Daten als höchstgenaue Datengrundlage sowie die Entwicklung von Algorithmen und Verfahren seitens ihrer Auswertung. Durch den Aufbau eines Laserdaten-Informationssystems in welchem die Laserscanning-Daten in einer speziell abgestimmten Datenbank abgespeichert werden, wird eine umfassende Analyse dieser Daten über große Flächen möglich. In einem ersten Schritt werden aus den Datensätzen über objektorientierte Klassifikationsansätze die Dächer der Gebäude extrahiert. Die hochgenauen geometrischen Informationen der Laserscanning-Daten bleiben während des gesamten Klassifikationsprozesses erhalten. Informationen über die Neigungs- und Expositionseigenschaften der jeweiligen Dachflächen werden ebenfalls berechnet. Des Weiteren werden die Grundrisse der erfassten Gebäude als eigenständiger Informationslayer abgespeichert. Die Berechnung des Solarpotenzials für die extrahierten Dachflächen erfolgt anschließend in Abhängigkeit der Ausrichtung (Neigung und Exposition) der einzelnen Dachflächen für das Gesamtgebiet im Rasterformat und für kleinere Testgebiete im Vektor(=Punkt)format, wobei die Einstrahlung als Summe der direkten Strahlung und der diffusen Himmelsstrahlung gerechnet wird. Die Berechnung wird unter Annahme einer Standardatmosphäre durchgeführt. Dabei wird in Abhängigkeit der Jahres- und Uhrzeit der Sonnenstand für die gegebene geographische Länge und Breite ermittelt und so die Abweichung der Sonneneinstrahlung zur der Flächennormalen des Hausdachs errechnet. Dabei werden sowohl die topographische als auch die objektbasierte Verschattung durch Bäume oder andere Objekte berücksichtigt.

Diese Arbeit ist folgendermaßen gegliedert. Die inhaltliche Darstellung befasst sich zunächst mit der Aufbereitung und Verarbeitung der Laserscanning Datensätze. Anschließend daran erfolgt eine Beschreibung der Ableitung der Dachflächen aus den Laserscanning Daten und die Berechnung ihres Solarpotenzials aufgrund ihrer Neigungs- und Expositionseigenschaften. Dabei werden Punkt- und Rasterdatensätze getrennt voneinander behandelt. Eine Darstellung der Ergebnisse und der Schlussfolgerungen findet sich am Ende dieser Arbeit.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Laserscanning-Datensätze

Für das gesamte Nuts-3-Gebiet Rheintal-Bodenseegebiet wurden vom Landesvermessungsamt Feldkirch die Grundlagendaten für das Projekt zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um das Digitale Geländemodell (DTM) und um das Digitale Oberflächenmodell (DSM) in der Projektion Gauss Krüger M28, sowie für Teilbereiche um die Laserscanning-Punktdaten, die auch als Datengrundlage für die Erstellung des DTM und DTM fungieren.

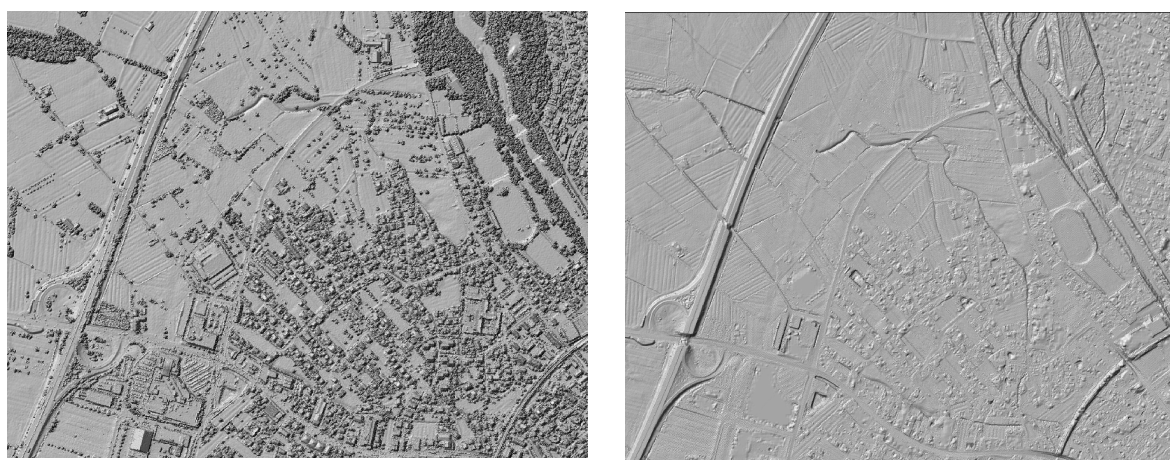


Abbildung 1: Shaded Relief Oberflächenmodell (links), Geländemodell (rechts) der verwendeten Daten

DTM in DSM lagen in 1m Auflösung aufgerastert in je 163 Einzelkacheln im ArcInfo Grid Format vor. Jede Kachel hat eine Größe von 2500 m mal 2500 m. Beide Datensätze wurden in ein Laserdaten-Informationssystem (LIS) mithilfe speziell entwickelter Prozeduren importiert. Das Laserdaten-Informationssystem baut auf dem OpenSource GIS SAGA auf, das auf digitale Reliefanalyse spezialisiert ist. Ein Import der Laserscanning Punktdaten in das LIS System, sowie ihre Metainformation (Flugstreifen, First Echo, Last Echo etc.) über das ASCII Format fand ebenfalls statt. Die Extents der Raster sowie die Punktdaten selbst werden in einer objektrelationalen PostgreSQL Datenbank mit der PostGIS Erweiterung zum Handling von räumlichen Daten gespeichert. Das entwickelte Datenbankmodell für die Punktdaten ist hierarchisch aufgebaut und erlaubt somit einen schnellen Zugriff auf die Einzelpunkte. Damit lagen alle Datensätze in einem Datenbanksystem vor und konnten über das LIS System für weitergehende Verarbeitungsschritte extrahiert und analysiert werden.

2.2 Klassifikation der Dachflächen aus Laserscanning-Daten

Im Rahmen dieses Projekts werden 2 Ansätze zur Berechnung des Solarpotenzials von Dachflächen auf Basis von Laserscanning Daten verfolgt.

- a) Extraktion der Dachflächen und Berechnung des Solarpotenzials innerhalb der 3D Punktwolke (vektorbasierter Ansatz)
- b) Extraktion und Berechnung des Solarpotenzials unter Verwendung eines 2.5 D Oberflächenmodells (rasterbasierter Ansatz)

Während der vektorbasierte Ansatz aufgrund der immensen Menge an Punktdaten und der Komplexität des Algorithmus zur Extraktion der Dachflächen einen sehr hohen Rechenaufwand und eine enorme Speicherkapazität erfordert und damit nur auf ein kleines Testgebiet angewendet werden kann, lässt sich der rasterbasierte Ansatz ohne größere Probleme (Speicher, Zeit, Rechenauslastung) auf die gesamte Fläche Vorarlbergs anwenden. Der erste Ansatz dient in erster Linie dazu den Stand der Forschung bezüglich der Solarpotenzialberechnung aus ALS Daten voranzutreiben und Alternativen zu bisher gängigen Verfahren aufzuzeigen. Im Folgenden werden die bisher erlangten Ergebnisse beider Ansätze dargestellt.

2.2.1 Vektorbasierter Ansatz

2.2.1.1 Testgebiet

Das ausgewählte Testgebiet befindet sich in einem Wohngebiet innerhalb der Gemeinde Feldkirch (Vorarlberg / Österreich) und deckt eine Fläche von ca. 1 km x 1 km ab. Die dort befindlichen Häuser und Gebäudekomplexe sind meist durch Satteldächer mit mehr oder weniger komplexen Dachaufbauten (z.B. Dachgauben) gekennzeichnet. Darüber hinaus findet man innerhalb des Testgebietes kleinere Strukturen wie Autos, Zäune, Hecken und weitere Vegetationstypen mit unterschiedlichen Erscheinungsformen. Die Wahl dieses Testgebietes ist mit der enorm hohen Punktdichte innerhalb dieses Gebietes zu begründen, welche eine sehr genaue Erfassung der Dachflächen gewährleistet. Sie liegt bei ca. 16 Punkten pro Quadratmeter und ist somit um ein Vielfaches höher als in anderen Regionen des Projektgebietes.

2.2.1.2 Ableitung der Dachflächen und ihrer Eigenschaften

Die Ableitung der Dachflächen gliedert sich in mehrere Unterpunkte, die anschließend im Detail beschrieben werden. Bevor mit der eigentlichen Ableitung begonnen werden kann, erfolgt zunächst eine Auswahl aller Punkte, welche sich mehr als 2.0 Meter über dem Boden befinden. Dadurch wird nicht nur die Datenmenge erheblich reduziert, sondern darüber hinaus kann sichergestellt werden, dass nur jene Punkte Eingang in die Berechnung finden, welche möglicherweise von einem Gebäude reflektiert wurden. Potenzielle Bodenpunkte und der Einfluss des Reliefs werden somit eliminiert. Anschließend wird der Normalenvektor eines jeden Punktes und dessen Rauheit berechnet. Die darauf folgende Ableitung der Dachsegmente erfolgt durch einen sogenannten „Region Growing“ Algorithmus innerhalb der verbleibenden Punktwolke. Nachdem die Segmente erfolgreich abgeleitet wurden, wird deren

Neigung, Exposition und Fläche bestimmt. Nur mit Hilfe dieser Parameter kann die Berechnung des Solarpotenzials pro Dachsegment erfolgreich durchgeführt werden.

Normalisierung der Punktwolke

Eine Normalisierung der Punktwolke dient in erster Linie dazu die relativen Höhen aller Punkte d.h. die Höhe des jeweiligen Punktes über dem Gelände zu ermitteln. Anschließend können jene Punkte ausgewählt werden, welche sich mehr als 2 Meter über dem Gelände befinden. Die Normalisierung der Punktwolke erfolgt mit Hilfe eines digitalen Geländemodells. Die Punktwolke wird zunächst über dieses projiziert. Nun wird der Höhenwert der Rasterzelle, in dem sich der jeweilige Punkt befindet bestimmt und vom Höhenwert des betreffenden Punktes abgezogen. Auf diese Weise erhält man die Höhe eines jeden Punktes über dem Gelände.

Im Folgenden werden alle Punkte, die sich 2 Meter über dem Gelände befinden für die weiteren Arbeitsschritte herangezogen. Diese Punkte werden im Folgenden als Objektpunkte bezeichnet. Diese beinhalten sowohl einen Teil der Vegetation als auch die Dachflächen, welche für dieses Projekt von Relevanz sind. Die Trennung von verbleibender Vegetation und Dachflächen erfolgt in einem späteren Arbeitsschritt. Eine Trennung von Objekt- und nicht Objektpunkten reicht hier zunächst völlig aus. Für die weiteren Arbeitsschritte ist es jedoch notwendig den Objektpunkten wieder ihre absoluten Höhenwerte zuzuweisen, da eine weitere Verwendung der relativen Höhen zu einer Verzerrung der Objekte führen kann. Dies ist vor allem in Gebieten der Fall, wo das zugrunde liegende Geländemodell nicht 100% flach, sondern durch hügeliges und geneigtes Gelände gekennzeichnet ist.

Berechnung des Normalenvektors und der Rauheit

Zur Berechnung des Normalenvektors auf jeden Punkt, muss dessen nähere Umgebung mit einbezogen werden. Dazu werden alle Punkte in einem sogenannten „KD-Tree“ geladen. Mit Hilfe des „KD-Trees“ ist es möglich orthogonale Bereichsanfragen im k-dimensionalen (hier: $k=3$) Raum durchzuführen. Die z.B. 20 nächsten Nachbarnpunkte im 3D Raum eines jeden Punktes dienen dazu eine Regressionsebene in diese Punkte zu legen. Dabei soll der quadratische Abstand von jedem dieser Punkte zur Ebene am geringsten sein. Der Normalenvektor auf diese Ebene entspricht dem Normalenvektor auf den entsprechenden Punkt. Dieses Verfahren wird auf jeden einzelnen Punkt der Punktwolke angewandt. Die folgende Abbildung soll dieses Vorgehen genauer veranschaulichen.

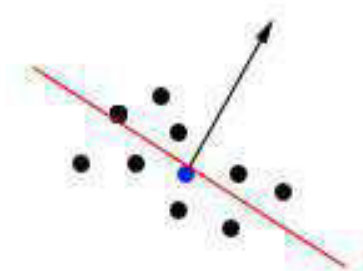


Abbildung 2: Bestimmung des Normalenvektors

Die rote Linie repräsentiert die Ebene, der blaue Punkt ist der Punkt für den der Normalenvektor bestimmt werden soll und die restlichen Punkte stellen die nächsten Nachbarn des blauen Punktes dar.

Zur Berechnung der Rauheit wird ebenfalls der oben beschriebene Ansatz verwendet. Es wird der Abstand von jedem dieser Punkte zu der Ebene berechnet. Befindet sich ein Punkt unterhalb der Ebene, so ist dessen Abstand negativ. Anschließend wird die Standardabweichung, welche hier ein Maß für die Rauheit darstellt, berechnet.

Ableitung der Segmente mittels Region Growing

Sobald der Normalenvektor und die Rauheit eines jeden Punktes bestimmt sind, kann mit der Ableitung der Dachsegmente begonnen werden. Je geringer die Rauheit eines Punktes, desto höher die Chance das der Punkt auf einer planaren Fläche und nicht innerhalb von Vegetation liegt. Daher wird die Punktwolke zunächst ansteigend nach ihrem Rauheitswert geordnet. Alle Punkte, deren Rauheitswert unter einem bestimmten Schwellenwert liegt sind potenzielle Startpunkte für den „Region Growing“ Prozess. Die n Nachbarpunkte (z.B. $n=12$) eines jeden Startpunktes werden nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Ähnlichkeit der Normalenvektoren
- 3D Abstand vom Startpunkt zum jeweiligen Nachbarpunkt ($<1\text{m}$)

Erfüllt ein Nachbarpunkt diese Kriterien so wird er dem aktuellen Segment zugeordnet und fungiert als nächster Startpunkt. Sobald das aktuelle Segment eine bestimmte Punktzahl erreicht hat (z.B. 5) wird eine Regressionsebene in die Punkte des Segments gelegt (siehe Abbildung 2) und der Normalenvektor auf diese Ebene dient als aktueller Normalenvektor zum Vergleich mit den Nachbarpunkten des aktuellen Startpunktes. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt bis kein neuer Punkt mehr dem aktuellen Segment hinzugefügt werden kann. Demnach wächst ein Segment so lange bis es den Dachfirst bzw. die Kante eines Hausdaches erreicht hat.



Abbildung 3: Abgeleitete Dachsegmente im Vergleich zum Orthophoto

Wie Abbildung 3 zeigt, können mit diesem Verfahren sowohl einfache Dachformen, bestehend aus zwei Dachsegmenten als auch komplexe Dachformen, bestehend aus mehreren Dachsegmenten abgeleitet werden.

Berechnung von Neigung und Exposition

Die Neigung einer Dachfläche ist der Winkel, welchen die Regressionsebene, die in das jeweilige Dachsegment gelegt wird und die horizontal liegende Ebene (Ebene, die von xy -Achse aufgespannt wird) einschließen. Zur Berechnung der Exposition wird der Normalenvektor des jeweiligen Dachsegmentes auf die xy -Ebene projiziert. Die Abweichung des projizierten Vektors von der y -Achse (nach Norden gerichtete Achse) wird zur Bestimmung der Exposition herangezogen. Der Winkel wird im Uhrzeigersinn gemessen und in 9 Klassen unterteilt.

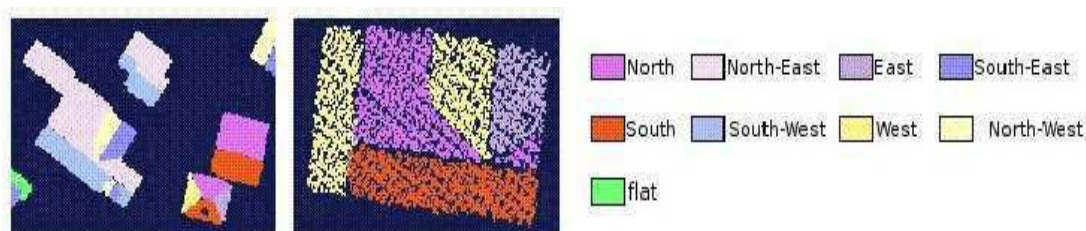


Abbildung 4: Ausgewählte Dachflächen klassifiziert nach Exposition

Abbildung 4 zeigt ausgewählte Dachflächen des Testgebietes, welche nach der Exposition klassifiziert wurden.

Berechnung der Fläche von Dachsegmenten

Nach Höfle et al. (2007) eignen sich sog. „alpha shapes“ (Edelsbrunner und Mücke, 1994) besonders dazu die Außengrenze einer nicht geordneten Punktwolke wiederzugeben. Im Folgenden wird die Fläche der einzelnen Dachsegmente mit Hilfe von „alpha shapes“ bestimmt. Dabei bestimmt der „alpha Wert“ die eigentliche Form der Außengrenze. Während ein sehr großer „alpha Wert“ die konvexe Hülle der Punktwolke wiedergibt, resultiert ein sehr kleiner „alpha Wert“ in der Form jedes einzelnen Punktes. Es gilt den „alpha Wert“ zu finden, welcher die eigentliche Außengrenze des jeweiligen Segments wiedergibt um dessen Fläche zu berechnen. In der folgenden Abbildung ist dies bildlich veranschaulicht worden.

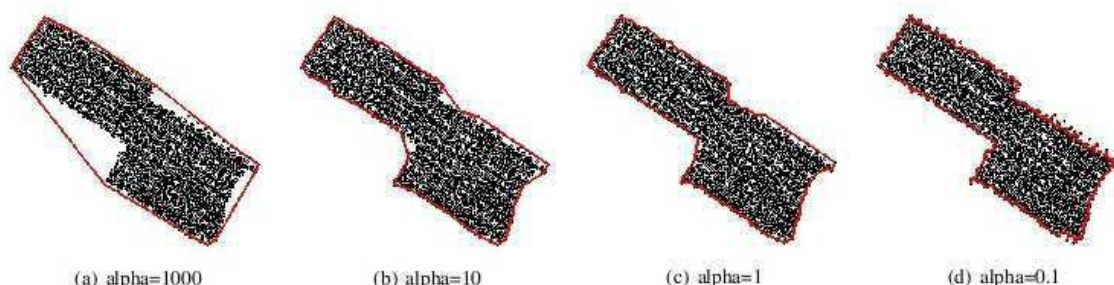


Abbildung 5: Abhängigkeit der generierten Außengrenze vom „alpha“ Wert

Die Aus

Die Grenze einer ungeordneten Punktwolke mit Hilfe von „alpha shapes“ lässt sich jedoch nur für eine 2D Punktwolke bestimmen. Das bedeutet, dass die 3D Punkte des jeweiligen Dachsegmentes zunächst auf die xy-Ebene projiziert werden müssen. Da es sich bei den Dachsegmenten meist jedoch um geneigte Flächen handelt muss eine Methode gefunden werden, welche die wahre Fläche der Dachsegmente in der xy-Ebene beibehält. Ein Setzen der z-Werte aller Punkte eines Segmentes auf den Wert Null würde bei geneigten Flächen zu einer Verkleinerung der wahren Fläche führen. Abbildung 6 veranschaulicht das Vorgehen, welches die wahre Fläche der Dachsegmente in der xy-Ebene beibehält. Zunächst werden die Punkte eines Dachsegmentes orthogonal auf deren Regressionsebene projiziert. Anschließend müssen die gleich großen Winkel β und

δ bestimmt werden, welche von der Neigung γ des Dachsegmentes abhängen. Diese bestimmen die Projektionsrichtung eines jeden Punktes. Sobald die Punkte auf die xy-Ebene projiziert wurden, kann die Fläche eines Dachsegmentes mit Hilfe von „alpha shapes“ berechnet werden.

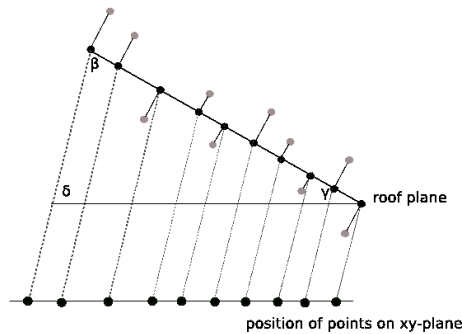


Abbildung 6: Projektion der 3D Punkte eines abgeleiteten Dachsegmentes auf die xy-Ebene. Die wahre Fläche eines geneigten Dachsegmentes wird beibehalten.

2.2.2 Rasterbasierter Ansatz

2.2.2.1 Ableitung von Gebäudegrundrisspolygonen

Methoden zur Filterung von Gebäudegrundrissen - meist auf Basis objektorientierter Bildverarbeitung und pattern recognition Algorithmen - sind in GIS-Softwarepaketen häufig implementiert oder als Zusatzfunktionen verfügbar. Im gegenständlichen Projekt ist jedoch ein höherer Automatisierungsgrad erwünscht, da die Datenmenge eine Herausforderung darstellt. Am Institut für Geographie der Universität Innsbruck wurden bereits eigene Algorithmen zur Extraktion von Gebäudegrundrissen (footprints) entwickelt (Pfeifer et al. 2007, Rutzinger et al. 2008), die für die Schaffung von Datengrundlagen für die Solarpotenzialanalysen noch weiterentwickelt werden. Das Verfahren der Dachflächenextraktion für die Solarpotenzialmodellierung gliedert sich in die Arbeitsschritte Vorprozessierung, Segmentierung und Klassifikation, wobei die Vorprozessierung die Ableitung eines normalisierten Oberflächenmodells (DSM-DGM) sowie die Ableitung von Hangneigung und Krümmung beinhaltet. Das so entstandene Bildkomposit wird unter Verwendung von objektorientierten Bildanalysemethoden in einzelne Oberflächensegmente aufgeteilt. Die Segmente sind ganze Oberflächenobjekte (Optimalfall die Hausoberfläche) oder Teile derselben (Regelfall). Geplant ist die Erfassung von Dachstrukturen in einer Größenordnung von mehr als 3 mal 3 Metern. Die Segmentgröße wurde bewusst groß gewählt, weil nur Gebäudeflächen mit einer Mindestgröße von 10 m² für eine Photovoltaiknutzung interessant sind. Daher sind kleinere Gebäudeflächen auch nicht als Gebäude klassifiziert. Diese Segmente werden im nächsten Schritt über bestimmte Eigenschaften (z.B. Oberflächenrauigkeit, Textur, Kompaktheit), auf Basis von Schwellenwerten mit Wahrscheinlichkeiten (Fuzzy-Logic) im Programm eCognition klassifiziert. Dann wird die Klassifikation an Stichproben mit Luftbildern überprüft und ggf. die Schwellenwerte zur Klassendifferenzierung adaptiert.

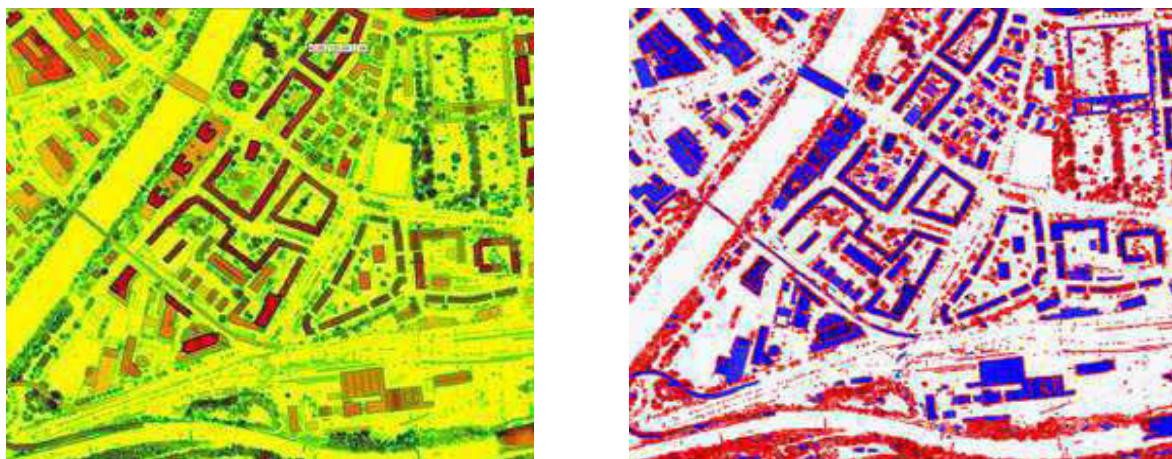


Abbildung 7: Vorprozessiertes Bildkomposit (links), Unterscheidung Dachflächen / Vegetation (rechts)

Diese Gebäudegrundrisse sind Grundlage für die Auswertung und Aufaggregation der Berechnungsergebnisse aus der Solarpotenzialmodellierung. Die Eigenschaften der Gebäudesegmente können als Regelwerk abgespeichert werden. Das gegenständliche Projekt hat aber auch gezeigt, dass die Übertragbarkeit dieser Regelwerke auf überregionaler Ebene nicht gegeben ist. Daher stellte es eine besondere Herausforderung dar, ein für das gesamte Projektgebiet verwendbares Eigenschaftensmuster abzuleiten. Dennoch ist eine manuelle Nachbearbeitung der Klassifikation erforderlich. Die nachfolgende Abbildung zeigt den verwendeten Regelsatz und die resultierenden Klassifikationsergebnisse für das Ortskerngebiet von Feldkirch.

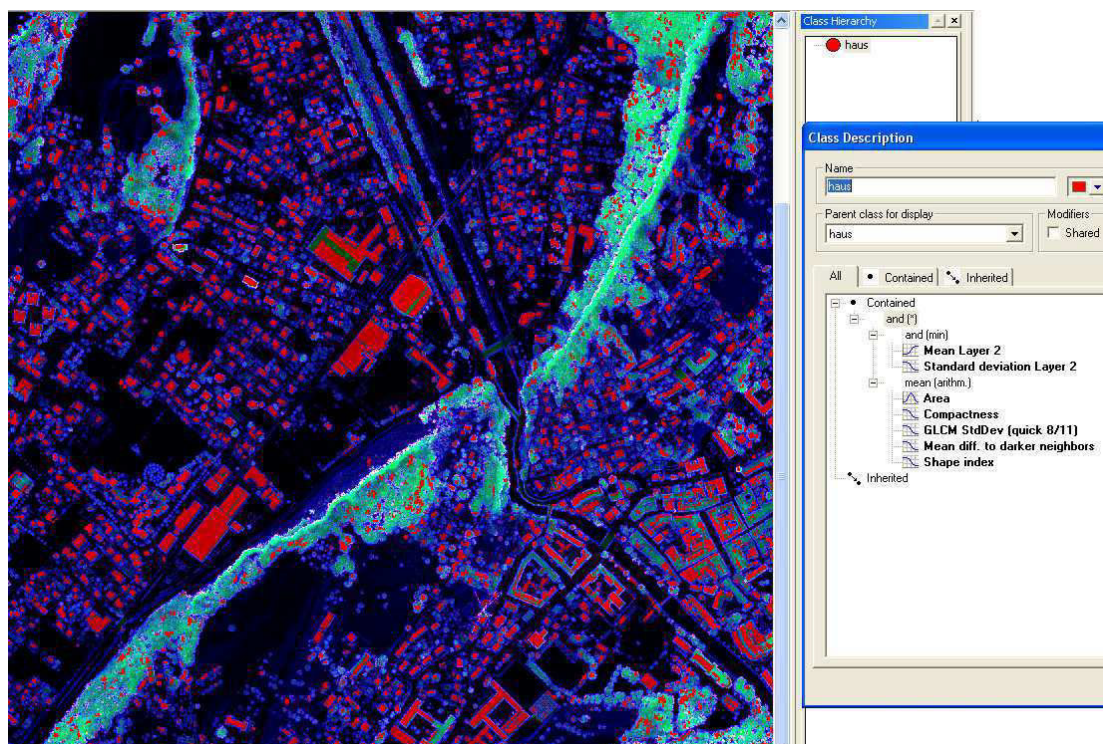


Abbildung 8: Ergebnisse der Gebäudeklassifikation mit „ecognition“

2.3 Berechnung des Solarpotenzials

2.3.1 Vektorbasierter Ansatz

Die Solarpotenzialanalysen werden innerhalb der originalen 3D Punktwolke durchgeführt. Eine Konvertierung der Punktwolke in das Rasterformat ist nicht notwendig. Bei diesen Analysen sind sowohl die Neigung, die Exposition als auch die Größe der jeweiligen Dachflächen von entscheidender Bedeutung. Die folgenden Analysen berücksichtigen sowohl den Einfluss der Bewölkung, der Fernverschattung durch angrenzendes Gebirge, als auch den Einfluss der Nahverschattung durch anstehende Vegetation und/oder Gebäude. Die Position der Sonne im Verlauf eines Jahres bzw. Tages, der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen auf die jeweilige Dachfläche sowie die Zeiten von Sonnenauf- und Sonnenuntergang können mit Hilfe der SOLPOS C Bibliothek berechnet werden. Diese Bibliothek wurde vom „National Renewable Energy Laboratory“ entwickelt (NREL, 2000).

Bewölkung und Fernverschattung

Der Einfluss der Bewölkung als auch der Einfluss der Fernverschattung werden mit Hilfe des sogenannten „clear sky index“ (k_c) berücksichtigt. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen der globalen Sonneneinstrahlung unter bewölkten (G_h) und der globalen Sonneneinstrahlung unter nicht bewölkten Bedingungen (G_{hc}). Daten einer nahe gelegenen meteorologischen Station repräsentieren dabei G_h . G_{hc} wird durch die modellierte Strahlung wiedergegeben. k_c wird für jeden einzelnen Tag eines Jahres berechnet und dient dazu die modellierte globale Einstrahlung zu korrigieren. k_c wird wie folgt berechnet:

$$k_c = G_h / G_{hc}$$

Dieses Verhältnis gibt den Grad der Bewölkung und den Einfluss der Fernverschattung wieder. Dieser Faktor gilt allerdings nur für horizontale Flächen. Geneigten Flächen weisen ein unterschiedliches Verhältnis von direkter und diffuser Einstrahlung auf. Daher müssten diese beiden Komponenten bei geneigten Flächen getrennt voneinander berechnet werden. In diesem Fall müsste die meteorologische Station die direkte und diffuse Einstrahlung getrennt voneinander aufzeichnen. Aufgrund eines Mangels dieser Daten wird k_c auch für geneigte Flächen angewandt.

Die Fernverschattung findet ebenfalls Eingang in den „clear sky index“, da die meteorologische Station nicht nur von der Bewölkung, sondern ebenfalls noch von der Verschattung des umgebenden Geländes betroffen ist. Zur Berechnung des „clear sky index“ wird die globale Einstrahlung für jeden Tag eines Jahres auf eine horizontale Fläche, welche sich in unmittelbarer Nähe der meteorologischen Station befindet, modelliert und als Wert für G_{hc} verwendet.

Nahverschattung

Die Verschattung eines jeden Punktes durch seine ihn umgebenden Objekte ist von zentraler Bedeutung für die einfallende solare Energie. Daher wird der 3D Horizont jedes einzelnen Dachpunktes innerhalb der 3D Punktwolke berechnet. Dadurch lässt sich feststellen, ob ein Dachpunkt bei einer bestimmten Sonnenposition durch ein anstehendes

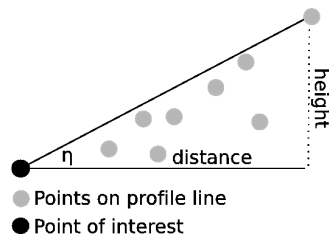


Abbildung 9: Veranschaulichung der Berechnung des 3D Horizontes

Objekt verdeckt wird. Falls dies der Fall ist, so wird für diesen Punkt nur die diffuse nicht jedoch die direkte Sonneneinstrahlung berechnet. Die Berechnung des 3D Horizontes ist in Abbildung 9 veranschaulicht.

Dazu wird zunächst ein Polygon vom „Point of interest“ mit definierter Länge (z.B. 60m) und Breite (z.B. 0.50 m) zum minimalen Azimuth Winkel, welchen die Sonne im Verlaufe eines Jahres erreicht, aufgezogen. Alle darin befindlichen Punkte werden für die Berechnung des Horizontes für diese Richtung herangezogen. Dabei bestimmt das Verhältnis von Distanz und Höhe den Winkel n . Der größte Winkel n entspricht dem minimalen Sonneneinfallswinkel der notwendig ist, damit der „Point of interest“ nicht mehr im Schatten eines Objektes ist falls die Sonnenstrahlen aus dieser Richtung einfallen. Nun wird das Polygon in definierten Grad Schritten (z.B. 0.3°) rotiert und anschließend der Horizont für die nun aktuelle Richtung bestimmt. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis der maximale Azimuth Winkel eines Jahres erreicht ist. Als Ergebnis erhält man den 3D Horizont des „Point of interest“. Dieser Schritt wird für jeden detektierten Dachpunkt ausgeführt. Falls ein umgebender Objektpunkt keine weiteren Punkte innerhalb einer definierten Distanz aufweist, so wird angenommen, dass dieser z.B. von einem Vogel oder ähnlichem reflektiert wurde. Dieser Punkt wird daher nicht bei der Berechnung der Nahverschattung berücksichtigt. Andererseits würde sich dieser Punkt auf die Verschattung wie eine Mauer auswirken. Das Gleiche gilt natürlich für Hochspannungsleitungen. Punkte auf diesen Leitungen können mit Hilfe von Methoden, die für die Erkennung linearer Objekte innerhalb von Punktwolken entwickelt wurden erkannt und eliminiert werden (Pfeifer und Briese, 2007).

Implementierung

Die Solarpotenzialanalysen werden für jeden einzelnen Punkt eines Dachsegmentes durchgeführt. Dabei wird die Position der Sonne für jeden Tag eines Jahres von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang in Zeitintervallen von einer Stunde bestimmt. Falls der entsprechende Dachpunkt durch ein anstehendes Objekt bei einer bestimmten Sonnenposition verschattet wird, so findet nur die diffuse Sonneneinstrahlung Eingang in die Berechnungen. Der „clear sky index“ des jeweiligen Tages wird im Anschluss mit den modellierten Werten des entsprechenden Tages multipliziert. Dadurch wird sowohl die Bewölkung als auch die Verschattung durch das umliegende Gelände berücksichtigt. Durch Aufsummierung der

Tageswerte erhält man die potenziell mögliche Sonneneinstrahlung auf den jeweiligen Punkt pro Jahr. Anschließend kann der Mittelwert der Sonneneinstrahlung eines Dachsegmentes berechnet werden. Durch das Vorgehen, jeden Punkt eines Dachsegmentes einzeln für die Berechnungen heranzuziehen, ist es möglich geeignete von weniger geeigneten Bereichen für die Installation von Solar- oder Photovoltaikanlagen voneinander abzugrenzen.

2.3.2 Rasterbasierter Ansatz

Ziel ist es die hohe Detailschärfe des Laseroberflächenmodells möglichst verlustfrei in die Strahlungsmodellierung einzubringen. Die Modellierung ist als Preprocessing anzusehen, auf deren Grundlage verschiedensten Kundenanforderungen abgedeckt werden können, ohne einen neuen Modelldurchlauf zu starten. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, bei denen die mögliche Nutzung bereits Bestandteil der Analyse ist, kann hier nach Ablauf der Prozessierung in wechselnden Szenarien analysiert werden.

Dieselbe Überlegung führte auch zur Entscheidung die Modellierung in Einzelzeitschritten durchzuführen. Die Verwendung von sogenannten „sky models“, die eine Modellierung von z.B. Monatssummen in einem Rechendurchgang ermöglicht hätten, würden eine nachträgliche Übertragung der Ergebnisse auf andere beliebige Zeitintervalle erschweren.

Bisher wurden 2 verschiedene Open Source Produkte auf ihre Verwendbarkeit beziehungsweise Adaptierbarkeit in Bezug auf die gegenständliche Fragestellung hin untersucht: GRASS-GIS und SAGA-GIS mit den entwickelten Laserdaten Informationssystem Erweiterungen.

Im SAGA-GIS mit den LIS-Extensions stehen zwei Module zur Strahlungsmodellierung zur Verfügung; eines davon berücksichtigt auch atmosphärische Parameter und gibt diffuse Strahlung als Ausgabedatensatz aus. Die Performanz ist um mehr als den Faktor 10 besser als bei der Verwendung von GRASS GIS. Nachteil ist, dass in der Basiskonfiguration die temporären Datensätze in den Arbeitsspeicher geschrieben werden, was eine Verwendung des gesamten Untersuchungsgebietes unterbindet. Die temporären Files können auch auf die Festplatte gespeichert werden, dies verlangsamt aber wieder die Performanz sehr stark. Ausschlaggebend für die Verwendung von SAGA-GIS ist die Performanz. Weil der Rastereingangsdatensatz für das Nuts-3-Gebiet Rheintal-Bodenseegebiet 14 GB groß ist, wurde eine Prozessierung in räumlichen Teilkacheln notwendig. Das Oberflächenmodell und das Geländemodell liegen bereits in 2.500m x 2.500m Kacheln vor. Bei der Erstellung der Prozessierungskacheln ist die Fernverschattung zu berücksichtigen. Dabei wurde zunächst je nach Modellierungszeitpunkt eine unterschiedliche Kachelung erzeugt. Ausreichend große Überlappungen der Einzelkacheln erfüllen die Bedingung, dass eine Kachelgrenze nie eine Schattenfläche schneiden darf, weil mit einer ganzen Kachelbreite gerechnet wurde und beim Zusammenfügen der Kacheln die Tageszeit berücksichtigt wurde. Der gesamte Ablauf wurde in Form von Shellsripten automatisiert und für den gesamten Dauersiedlungsraum im Rheintal durchgeführt (Ergebnis siehe folgende Abbildung).

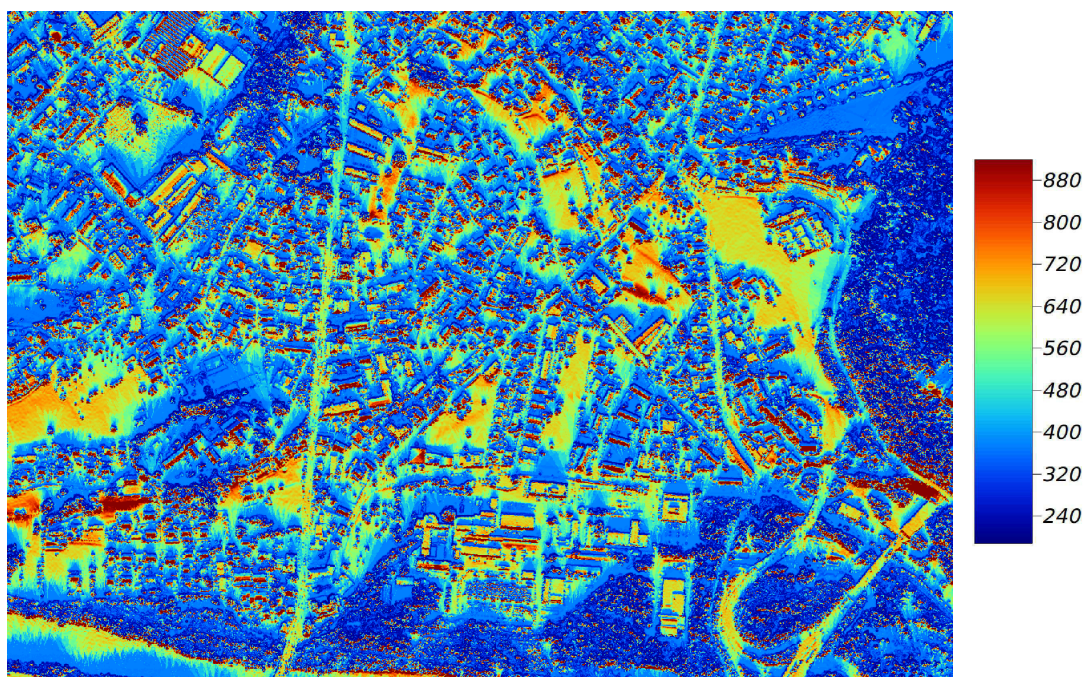


Abbildung 10: Solarpotenzial an einem Wintertag in Wh / Quadratmeter

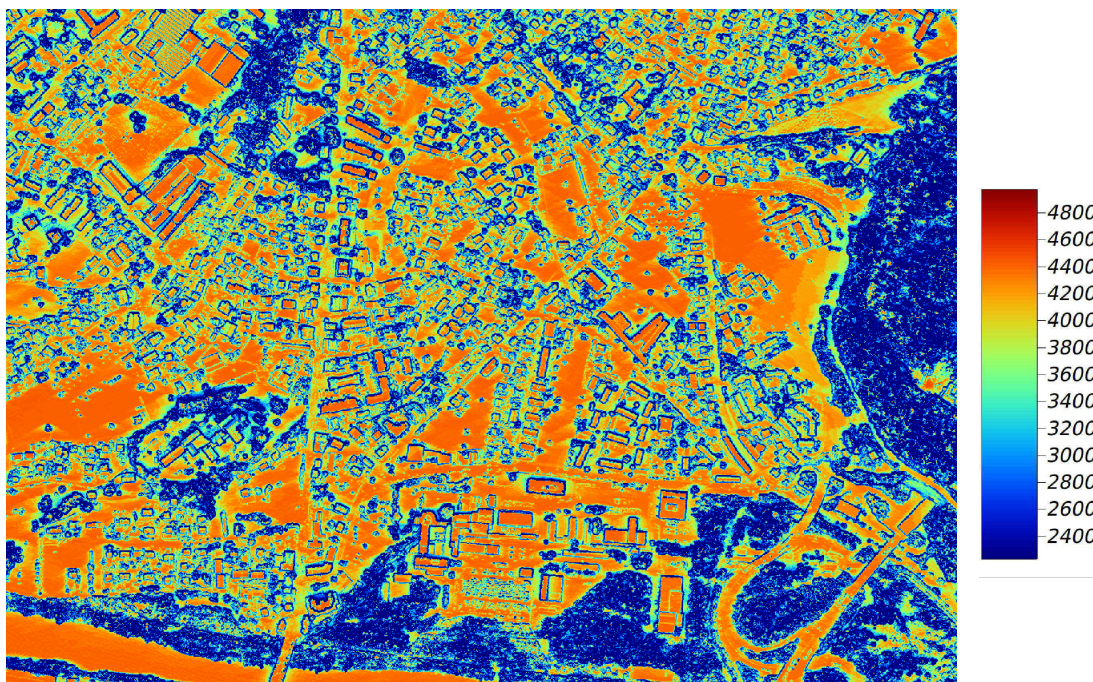


Abbildung 11: Solarpotenzial an einem Sommertag in Wh / Quadratmeter

In der Folge wurden weitere zwei Saga-GIS Module entwickelt, so dass die Berechnungen von einer benutzerfreundlichen Oberfläche gestartet werden können. Die beiden Module gehen von zwei unterschiedlichen Szenarien bezüglich der Zielgebiete der Modellierung aus. Szenario 1 ist ein relativ kleines Analysegebiet, welches in einer Gebirgslandschaft eingebettet ist. Hier wird mit zwei unterschiedlichen Auslösungen Fern- und Nahverschattung getrennt, nacheinander prozessiert. Szenario 2 wurde für die Modellierung ganz Vorarlbergs konzipiert. Eingabe ist hier ein ganzer Rasterkatalog. Hier ist wird die neu entwickelte „shadow propagation“ angewandt, das heißt die Schattenhöhe wird von Kachel zu Kachel durch den Rasterkatalog weitergereicht.

Szenario 1: Multiskalare Fernverschattungsanalyse

Die Schattenanalyse für ein bestimmtes Zielgebiet der Strahlungsmodellierung erfolgt hier in zwei Phasen. Zunächst wird aus einem grob aufgelösten Geländemodell die Lage der Bergschatten für die einzelnen Zeitschritte bestimmt. Dabei werden nur solchen Schatten berücksichtigt, bei denen Schattenquelle und beschattetes Objekt weiter als ein bestimmter Grenzwert (z.B. 200m) voneinander entfernt liegen. Der gleiche Grenzwert dient dann bei der zweiten Modellierungsphase, in der die Nahverschattung bestimmt wird als Wert für die Breite der Überlappung der Prozessierungskacheln. Abbildung 12 zeigt eine solche in Phase 1 erstellte Fernschattenmaske. für einen Morgenstunde im Winter. Es ist zu erkennen dass nur die Fernschatten (hier oft auf den Gegenhängen) ausgewiesen sind.

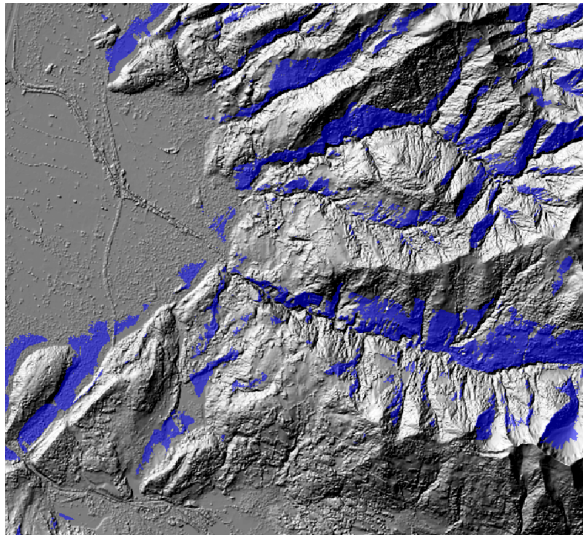


Abbildung 12: Fernschattenmaske

Szenario 2 „shadow propagation“

Die Hauptproblematik bei der Prozessierung sehr großer Datenmengen besteht in der Berücksichtigung der Fernwirkung der Schatten. Diese steht der Festlegung von Kachelgrenzen bei weit verbreiteten ray-tracing Verfahren im Wege, weil immer von der Lichtquelle ausgehend linear gerechnet wird, und daher die Information über die Schattenquellen nicht über die Kachelgrenzen weitergegeben werden. Die hier erarbeitete Lösung besteht in der flächigen Berechnung der Schattenhöhen für die einzelnen Zeitschritte parallel mit der Strahlungsberechnung. Somit müssen für die Schattenanalyse jeweils nur 2 Nachbarpixel betrachtet werden. Abbildung 13 ist eine Darstellung dieses Schattenhöhengrids im Vergleich mit dem Originaloberflächenmodell (links). Die Übergabe des Schattens von Kachel zu Kachel erfolgt mit der Übergabe der Schattenhöhe für eine Zeile und ein Spalte Randpixel aus der entsprechenden Nachbarkachel. Dieser Algorithmus ist um den Faktor 2 bis 3 mal schneller als die Schattenberechnung über ray-tracing Verfahren

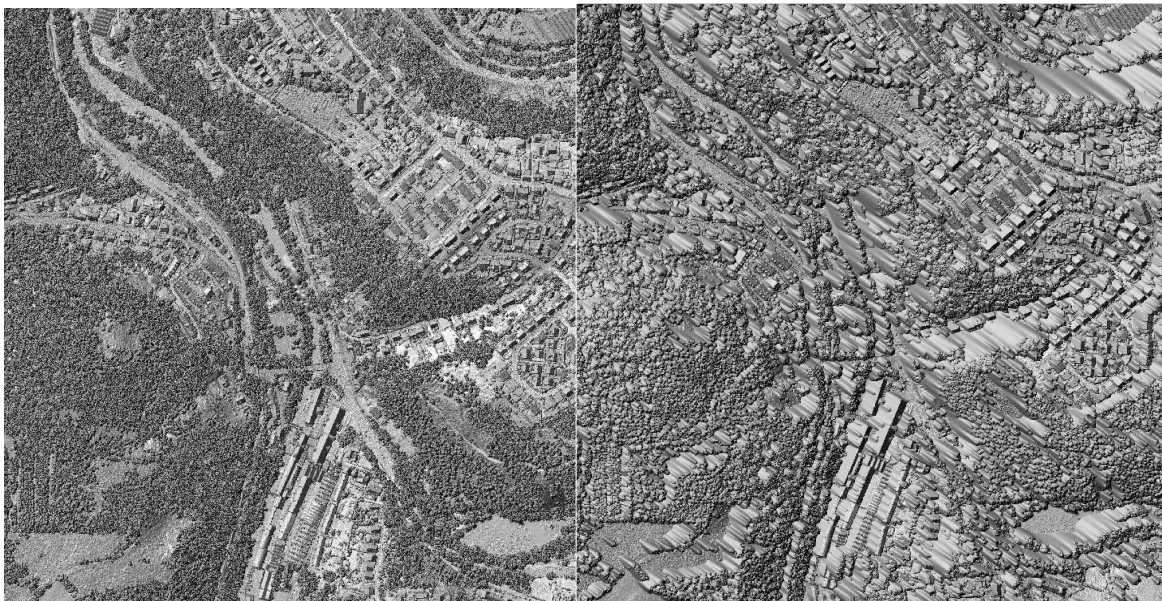


Abbildung 13: Hilfsraster mit der Schattenhöhe (rechts) (Beispiel Wuppertal), Vormittag

3 Ergebnisse

3.1 Solarpotenzialanalysen des vektorbasierten Ansatzes

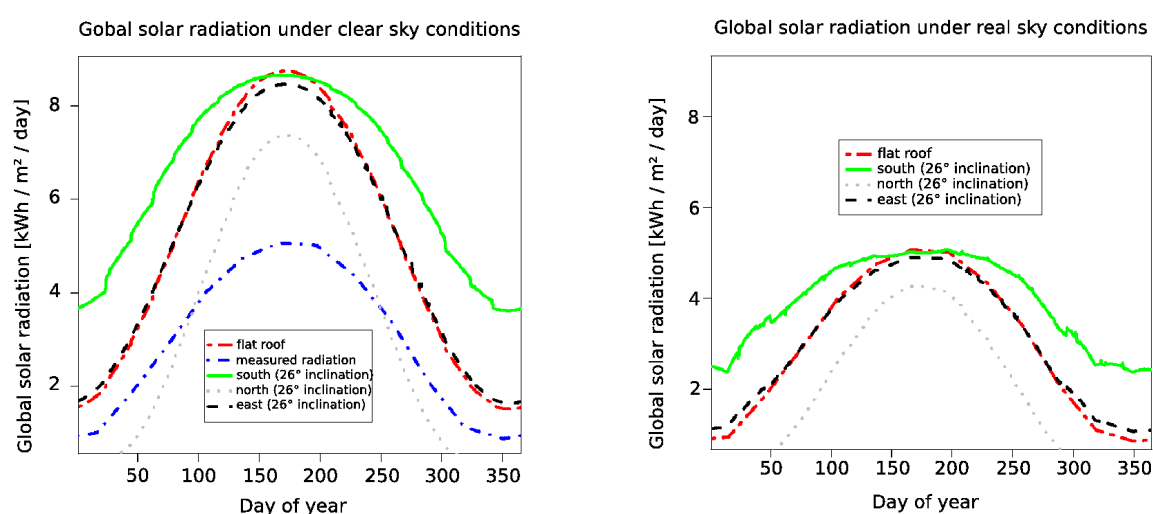


Abbildung 14: Verlauf der Sonneneinstrahlung während eines Jahres.

Die folgenden Grafiken stellen den Verlauf der Sonneneinstrahlung im Laufe eines Jahres auf geneigte Dachflächen (26° Neigung) mit unterschiedlicher Exposition dar. Dabei wird sowohl die Sonneneinstrahlung unter bewölkten als auch nicht bewölkten Bedingungen dargestellt. Der „clear sky index“ dient dazu, die Sonneneinstrahlung unter nicht bewölkten Bedingungen zu reduzieren und somit die realen Bedingungen wiederzugeben. Die Verschattung durch anstehende Objekte wird hier nicht berücksichtigt. Sie ist sehr variabel und unterscheidet sich von Dachfläche zu Dachfläche.

Die linke Abbildung, welche die Sonneneinstrahlung unter nicht bewölkten Bedingungen wiedergibt, enthält zusätzlich noch den Verlauf der an der meteorologischen Station gemessenen solaren Einstrahlung. Während ein horizontales Dach unter nicht bewölkten Bedingungen eine maximale globale Sonneneinstrahlung von 8.754 kWh/m²/Tag erreicht, liegt der maximale Wert für die gleiche Dachfläche unter Berücksichtigung der Bewölkung bei 5.068 kWh/m²/Tag. Weiters kann festgestellt werden, dass die Exposition von enormer Bedeutung für die Aufnahme von solarer Energie ist. Sie wirkt sich vor allem in den Herbst-, Winter- und Frühlingsmonaten besonders aus. In diesen Monaten erhalten vor allem südlich ausgerichtete Dachflächen die meiste solare Einstrahlung. Während der Sommermonate sind es die horizontalen Flächen, welche die meiste Energiezufuhr erhalten. Der Einfallswinkel der Sonne ist

während des Sommers auf horizontale Flächen steiler als auf Flächen, welche 26° in südlicher Richtung ausgerichtet sind.

Ein weiteres Ergebnis ist in Abbildung 15 dargestellt. Der berechnete 3D Horizont eines jeden Punktes wird verwendet um die Schatten angrenzender Objekte zu berücksichtigen. Bereiche, die von solchen Schatten beeinflusst werden, erhalten weniger Energie als Bereiche die von keinerlei Nahverschattung betroffen sind. Die Pfeile in Abbildung 15 stellen Bereiche dar, die möglicherweise durch Nahverschattung angrenzender Objekte beeinflusst werden.

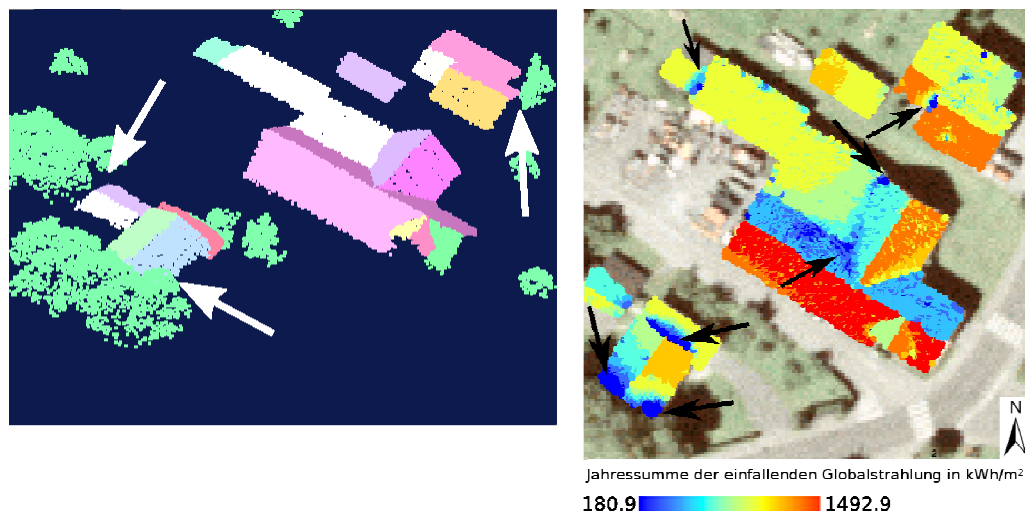


Abbildung 15: Exemplarische Darstellung der einfallenden Solarstrahlung innerhalb eines Jahres auf ausgewählte Dachsegmente. Die Pfeile weisen auf Bereiche hin, die möglicherweise von Schatten angrenzender Objekte beeinflusst werden.

3.2 Solarpotenzialanalysen des rasterbasierten Ansatzes

Nach Abschluss der Modellierung liegen 21 Rasterdatensätze für das Vorarlberger Rheintal vor. Sie umfassen:

- Jahresstrahlungswert in kWh pro Quadratmeter und Jahr
- Monatsstrahlungswerte in kWh pro Quadratmeter und Monat
- Sommerhalbjahr in kWh pro Quadratmeter und Sommerhalbjahr (April-Sept.)
- Winterhalbjahr in kWh pro Quadratmeter und Winterhalbjahr (Okt-März)
- 4 Jahreszeiten in kWh pro Quadratmeter und Dez.-Feb., März-Mai., Jun.-Aug., Sept.-Nov.
- Wintermaximum kWh pro Quadratmeter am 21. Dez.
- Sommerminimum kWh pro Quadratmeter am 21. Jun.

Die Jahreszeiten sind meteorologische Jahreszeiten (z.B. Dezember bis einschließlich Februar), Halbjahre z.B. von Januar bis Ende Juni.

Diese Rasterprodukte wurden mit langjährigen meteorologischen Messwerten der Globalstrahlung (ZAMG 1971 - 2000) anhand von horizontalen, unbeschatteten Flächen verglichen. Dabei wurden die Stationen Bregenz und Feldkirch verwendet und so eine schräge Ebene mit Korrekturfaktoren ermittelt und in die Modellierungsergebnisse eingerechnet. Die häufigeren Nebellagen am Bodensee konnten so

zum Teil berücksichtigt werden¹.

Weiters gehören Tabellen (dbf-Dateien) mit den Attributen (min, max, range, sum, mean) für die oben genannten Raster zu den Gebäudeumringen. Die folgende Abbildung zeigt Gebäudeumringe mit Farbkodierung einer Eignung der Gebäude durch ein hohes Solarpotenzial (hoher mean-Wert).

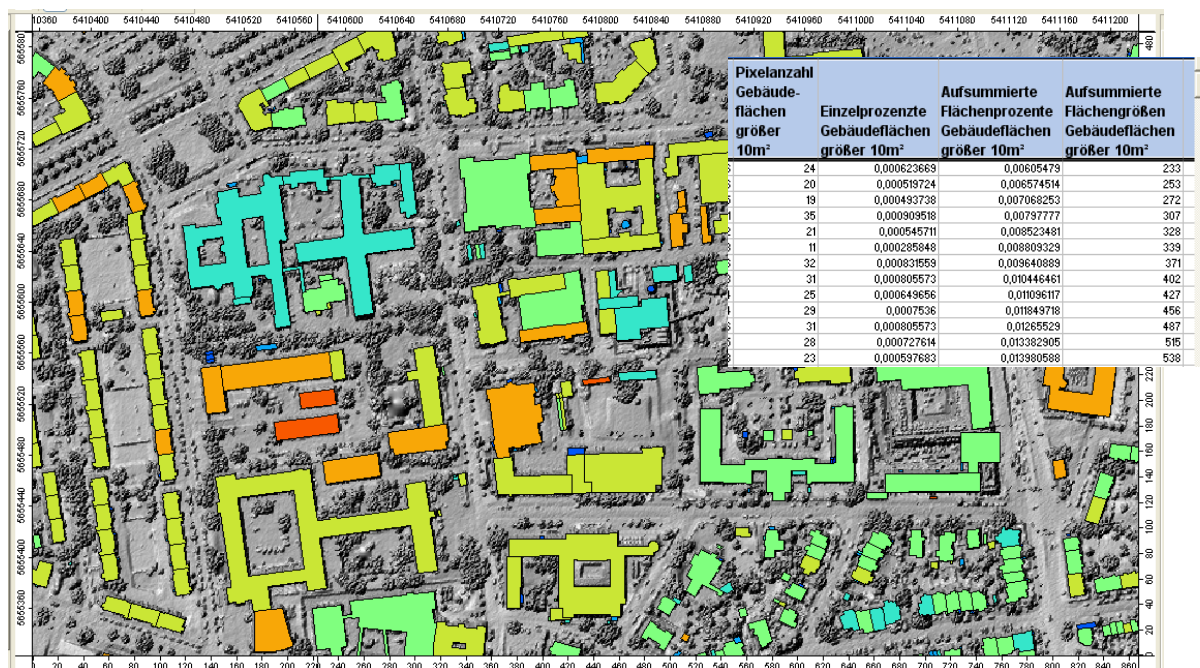


Abbildung 16: Gebäudeumrisse, farbkoloriert nach Solarpotenzial (rot hoch, blau gering)

Die Ergebnisse wurden in den Webatlas der Vorarlberger Landesregierung integriert und sind dort für jeden Bürger abrufbar.

¹Klimadaten von Österreich 1971 – 2000 auf der Website des ZAMG
http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm

4 Schlussfolgerungen

Die aus den Projektarbeiten gewonnenen Erkenntnisse zeigen deutlich die Einsatzmöglichkeiten von hoch aufgelösten digitalen Oberflächenmodellen für die Berechnung des Solarpotenzials. Jedoch muss man sich zur Vergegenwärtigung die Frage stellen: Was ist die Ausgangssituation im Bereich der Solarpotenzialanalysen? Bisher gab es die mittelaufgelösten Globalstrahlungs- und Besonnungskarten die die klassischen Geländemodelle in einer Auflösung von 10 bis 25 Meter verwendet haben. Im Rahmen der bisherigen kleinräumigen Solaranalyse in CAD-Programmen lassen sich diese Solarpotenzialanalysen auf sehr engen Maßstab begrenzt durchführen.

Durch Laserscanning-Daten ist heute das Potenzial vorhanden, Informationsprodukte in sehr hoher Auflösung bereitzustellen. Wo es vorher nicht möglich war, Gebäude, Vegetation und die Topographie mitzuberücksichtigen, lässt sich jetzt jede Anwendung schlussendlich auf ein sehr viel flächendeckenderes, detailgetreu wiedergegebenes Gebiet ausbreiten. Ziel war deshalb die Adaption und Entwicklung von Algorithmen zur Ableitung des Solarpotenzials unter Berücksichtigung des maximal möglichen Detailreichtums (Auflösungsschärfe) in Kombination mit geringer aufgelösten Gelände-modellen im weiteren Umfeld. Es geht einerseits darum, über Parameter die Exposition, Neigung, Verschattung durch eine weiter umliegende Landschaft und die Topographie zu berücksichtigen. Andererseits können über Laserscanning-Daten Informationen über Vegetation und Bebauung im direkten Umfeld gewonnen werden. Sie sind in diesem Fall die Datenbasis in hoher Auflösung. Ziel ist eine adressscharfe, genaue räumliche Verortung der Gunstflächen, sodass daraus abgeleitet werden kann, wie viel Solarpotenzial es in einer Region gibt und wo besonders geeignete Standorte sind. Die Innovationen dabei liegen in der Inwertsetzung der Laserscanning-Daten und in der Datenverarbeitung. Durch die Größe der Datenmengen braucht es datenbankseitige Lösungskonzepte, multiskalare Analysen und entsprechende Analysewerkzeuge in der Ausführung der Solarpotenzial- und Sonnenstandsberechnung (Zusammenführung von Nah- und Fernverschattung).

Prinzipiell zeigten sich zwei Herangehensweisen, die sich einerseits auf das Rohformat stützen, auf die Punktdaten, andererseits auf die abgeleiteten Rasterdaten. Diese großen Punktdatenmengen können zwar ausgedünnt werden, allerdings verlangen sie in der Klassifikation der Daten hinsichtlich „Was ist eine Dachfläche? Welche Punkte gehören zu einer Dachfläche?“ komplexere und zeitintensivere Algorithmen, als dies in der Rasterdatenwelt der Fall ist. Dort kann man bereits seit einigen Jahren über die objektorientierten Klassifikationsverfahren, über Segmentierungen Nachbarschaften sehr schnell identifizieren und man kann die Daten auch sehr schnell in unterschiedlichen Auflösungen (mittel aufgelöste Geländemodelle, hoch aufgelöste Oberflächenmodelle) verarbeiten. Allerdings wird mit Überführung von Punktdaten in Rasterdaten ein gewisser Generalisierungsschritt vollzogen, was vielleicht bei sehr hohen Punktdichten zu Informationsverlusten führen kann. So sind beispielsweise Dachaufbauten hier möglicherweise einfach nicht mehr genügend repräsentiert. Wichtig für die Datenverarbeitung selbst war natürlich auch, eine entsprechende Kachelung zu schaffen, die den Datendurchsatz optimiert und dann in ein entsprechendes Processing übergeführt werden kann.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die Auswertungen des Solarpotenzials in seiner jetzigen Form umfassen Strahlungswerte pro Flächeneinheit und Zeitintervall. Die Zeitintervalle sind Jahres-, Jahreszeiten-, Monatswerte, sowie das Sommermaximum und Winterminimum. Berechnet werden dabei Kilowattstunden pro m² und Jahr etc. Zusätzlich wird für die Dachumringe bzw. die Dachteilflächen, die vom Auftraggeber bereitgestellt werden eine Analyse der darunterliegenden Rasterwerte vorgenommen. Die Dachpolygone enthalten dann die Maximal-, Minimal- und Mittelwerte der darunterliegenden Zellenwerte des Solarpotenzials sowie die Spannweite zwischen Maximum- und Minimumwert.

Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten sich mit einer weiteren Veredelung (Value Adding) dieser Strahlungswerte auseinandersetzen; dieses Value Adding bezieht sich auf die Umsetzung der Strahlungswerte in Energiewerte nach Abzug des Modulwirkungsgrades – für Photovoltaikanlagen einerseits und für Solarthermieranlagen andererseits. Zur Verbesserung der Aussageschärfe der modellierten Werte ist im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten des Weiteren ein Versuchsstandort wünschenswert, an welchem die Modellwerte geeicht werden können. Dieser Versuchsstandort enthält Photovoltaik- und Solarthermieinstallationen, eine kontinuierliche Messapparatur sowie eine meteorologische Aufzeichnungsstation. Im Sinne einer Schärfung der Solarpotenzialaussagen können im rasterbasierten Ansatz weitere Abfragen und technische Einschränkungen berücksichtigt werden. So können durch die Berücksichtigung von Mindestflächen und die Erreichung von Mindeststrahlungswerten für die energetische Verwertung Standortoptimierungen vorgenommen werden. Diese gewonnenen Energiewerte können für Wirtschaftlichkeitsanalysen in monetäre Werte übergeführt werden. Dabei sind die regional relevanten Förderregelungen zu berücksichtigen, andererseits kann dadurch auch die Amortisationsdauer von potenziellen Anlagen bei Berücksichtigung der Investitionskosten bestimmt werden.

Das **Weiterarbeiten** mit den Projektergebnissen orientiert sich in Richtung spartenspezifische Auswertung. So spaltet sich die Verwertung der berechneten Energiewerte des Solarpotenzials in die Nutzung mittels Photovoltaikanlagen einerseits und für Solarthermieranlagen andererseits auf. Schritte die sich an die konkrete Auswertung anschließen sind die Umwandlung der Energiewerte in umsetzbare Energieleistung in Abhängigkeit von den systemspezifischen Wirkungsgraden (15-18% bei Photovoltaik und ca. 50% bei Solarthermie). Die umgesetzten Energieleistungen können die Tonnen eingesparten CO₂ übergeführt werden, und helfen so in der Energie-Bilanzierung größerer Gebietseinheiten, bei der Einschätzung von Energieautarkie-Zielen, der Planung von Modellregionen oder der Einschätzung konkreter Förderanträge. Bei der Analyse der Raster für die ganze Dachpolygone bietet sich vor diesem Auswertungshintergrund eine Klassifizierung der Dächer oder Dachsegmente in geeignet, bedingt geeignet oder ungeeignet an. Im Speziellen für die Einschätzung von Flachdächern ist ein Umrechnungsfaktor der Energiewerte für aufgeständerte Installationen von Solarthermie oder Photovoltaikanlagen zu entwickeln. Dabei ist zu berücksichtigen, welchen Flächenverbrauch diese

Aufständungen vor dem Hintergrund einer Minimierung ihrer gegenseitigen Verschattung benötigen. Je näher die Werte für einzelne Systemlösungen herangezogen werden sollen, um so mehr rückt die Frage nach einer geeigneten Eichmöglichkeit für die modellierten Energiewerte. Vergleichswerte reeller Anlagen können im Rahmen eines Versuchsstandortes erhoben werden, und bieten so eine Optimierungsgrundlage für die Modellwerte, die relativ zueinander richtig liegen, aber durch reelle Messwerte bestmöglich geeicht werden können.

6 Literatur

Edelsbrunner, H.; Mücke, E. (1994): Three-dimensional alpha shapes. ACM Trans. Graphics 1994, 13, 43-72.

Höfle, B.; Geist, T.; Rutzinger, M.; Pfeifer, N. (2007) : Glacier surface segmentation using airborne laser scanning point cloud and intensity data. In Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland; Vol. XXXVI, pp.195-200.

NREL (2000): Nrel 2000 - Solpos Documentation; Technical report, National Renewable Energy Laboratory, Center for Renewable Energy Resources Renewable Resource Data Center: Golden, CO,USA.

Pfeifer, N., Rutzinger, M., Rottensteiner, F., Mücke, W., Hollaus, M. (2007): Extraction of building footprints from airborne laser scanning: Comparison and validation techniques. Joint IEEE-GRSS/ISPRS Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Urban 2007, Paris, France. Published on CD-ROM. Invited paper.

Pfeifer, N.; Briese, C. (2007): Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. In Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland; Vol. XXXVI, pp. 311-319.

Rutzinger, M., Höfle, B., Pfeifer, N. (2008): Object detection in airborne laser scanning data - an integrative approach on object-based image and point cloud analysis, In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.: Object-based image analysis – spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.

IMPRESSUM

Verfasser

GRID-IT
Gesellschaft für angewandte Geoinformatik mbH

Hannes Kleindienst
Technikerstr. 21a, 6020 Innsbruck
Tel.: +43-(0)512-507 4860
Fax: +43-(0)512-507 4869
E-Mail: kleindienst@grid-it.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH