

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Berücksichtigung des Denkmalschutzes“ bei der Planung von Solaranlagen am Beispiel der Stadt Potsdam

vorgelegt von

Dipl.Ing.(FH) Romy Schröder
U1447, UNIGIS MSc Jahrgang 2009

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Berlin, 30.06.2012

Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Allen bedanken, die mich während meines UNIGIS Fernstudiums unterstützt haben. Vielen Dank besonders dem UNIGIS Team in Salzburg, die immer mit Ratschlägen und Hilfe (virtuell) zur Seite standen.

Ein Dankeschön an Albert Wiedemann, dem ich die Idee zu dieser Arbeit verdanke.

Ein besonderer Dank an Frau Cordine Lippert von der Koordinierungsstelle Klimaschutz der Stadtverwaltung Potsdam, welche mir die die benötigten Daten für diese Master Thesis zur Verfügung gestellt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Frau Ramona Dornbusch von der Unteren Denkmalschutzbehörde der Stadt Potsdam. Sie hat mir in Gesprächen zu Beginn dieser Arbeit einen Einblick in die Welt des Denkmalschutzes vermittelt und viele praktische Fragestellungen für die Ziele dieser Master Thesis mit auf den Weg gegeben.

Vielen Dank sage ich zu meinen Kollegen der Firma BSF Swissphoto GmbH, die mich bei fachlichen Fragen zu Thema Laserscanning unterstützt haben.

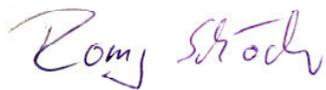
Mein größter Dank gilt meiner Familie und besonders meinem Freund Mike. Ohne die Unterstützung und Motivation und vor allem den Verzicht auf etliche gemeinsame Familienwochenenden wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere:

dass ich die Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe, dass ich diese Arbeit bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin bzw. einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe, dass diese Arbeit mit der von der Begutachterin bzw. vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Berlin, 30.06.2012



Romy Schröder

Kurzfassung

In dieser Master Thesis wird eine Methode vorgestellt, die Ergebnisse von Solarpotenzialanalysen genauer im Hinblick auf Denkmalschutzbelange untersucht.

Für zwei exemplarische Gebiete in der Stadt Potsdam wurden für die PV Nutzung geeignete Dachflächen auf ihre Eignung unter dem Gesichtspunkt des Denkmalschutzes analysiert.

Die Höhenmodelle, die zur Berechnung eines Solarpotenzialkatasters verwendet werden dienen dabei als Grundlage für eine Sichtbarkeitsanalyse. Verschneidet man alle von einem Dach aus sichtbaren Flächen mit einer klassifizierten Denkmalschutzkarte, so erhält man Informationen, welche und wie viele Flächen von Denkmalbereichen aus sichtbar sind.

Für die Analyse wurde ein Python Script für die Software ArcGIS von ESRI entwickelt. Mit diesem Script lassen sich solche Berechnung vollautomatisch für ausgewählte Dachflächen durchführen. Durch die Verwendung von flächendeckend vorhandenen Daten (DSM, DTM, topographische Karten und Denkmalschutzkarten) und populärer Software ist eine Übertragung des Analyseprinzips auch auf andere Städte und Gemeinden problemlos möglich.

Die resultierenden Ergebnisse können von Fachleuten der Denkmalschutzbehörde bei der Beurteilung von PV-Genehmigungsanträgen herangezogen werden und bieten eine gute Möglichkeit, sich bereits vom Schreibtisch aus über die Lage vor Ort zu informieren.

Als sehr schwierig erweist sich die Beurteilung der erreichten Genauigkeit, denn Sichtbarkeitsanalysen sind nur begrenzt mathematisch verifizierbar und von vielen Faktoren abhängig.

Abstract

Visibility analysis based on viewsheds is one of the most frequent tasks in GIS. In this Master Thesis viewsheds were used to determine the visibility of potential photovoltaic systems with special attention to heritage concerns.

Digital surface models provide the option to perform solar potential analysis but they can also be used to examine the areas that are visible from rooftops, suitable for photovoltaic systems. The combination of these viewsheds with classified heritage regions can provide information about which and how many listed areas are visible from a selected rooftop. This information might help to decide if a building permission for a solar collector is approved or not.

A python script was developed which analyzes the viewable area from a selected object. Afterwards a spatial intersect function is applied on both datasets, the viewshed and the classified heritage map. The result of this operation is a classified viewshed.

The tool has been successfully applied to two areas of interest in the city of Potsdam.

The script works well with ESRI software ArcGIS, a widely used and popular GIS program.

The python tool was designed in a way so that it can be used for similar tasks in other cities and communities, too.

The results of this Master Thesis are provided to the employees of the Potsdam Heritage Office. They offer a useful tool for pre-analyzing the situation in the field so that cost intensive on-site examinations can be reduced.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
1. Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Lösungsansatz	4
1.3 Zielpublikum der Master Thesis	4
1.4 Nichtziele der Masterarbeit	5
1.5 Struktur der Thesis (Flow-Diagramm/ Grafik).....	5
2. Eingangsdaten und Testgebiet	7
2.1 Das Projektgebiet.....	8
2.1.1 Geschichtliche Bedeutung Potsdams	9
2.1.2 Krongut Bornstedt.....	10
2.1.3 Lennéstraße	11
2.2 Laserscanning.....	12
2.2.1 Funktionsprinzip des Airborne Laserscanning.....	12
2.2.2 Technische Komponenten des ALS	14
2.2.3 Datenbearbeitung	17
2.2.4 DTM.....	19
2.3 Solarpotentialanalyse	22
2.3.1 Solare Strahlung.....	22
2.3.2 Standortfaktoren und Analysemethode	24
2.3.3 Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse	28
2.4 Topographische Karten, Denkmalschutzbereiche.....	29
3. Lösungsscript	33
3.1 Anforderungen	33
3.2 Idee/ Theorie	34
3.2.1 Begriff der Sichtbarkeit.....	35
3.2.2 Entwurf Analysemethode.....	40
3.3 Umsetzung und Berechnungsprozess	44
3.3.1 Klassifizierung nach Denkmalschutzkriterien	44
3.3.2 Entwurf des Analyse Scripts	47
3.3.3 Python Script.....	53
3.3.4 Einbindung der Aussichtstürme	59

4. Ergebnisse	62
4.1 Ergebnisse am Beispiel der Pfarrkirche Bornstedt	62
4.2 Genauigkeitsbetrachtung/ Ergebnisprüfung	67
5. Zusammenfassung und Ausblick	70
6. Literaturverzeichnis	72
7. Abbildungsverzeichnis	80
8. Tabellenverzeichnis	83
9. Abkürzungsverzeichnis	84

1. Einleitung

Ziel der Master Thesis ist es, die Ergebnisse von Solarpotentialanalysen genauer im Hinblick auf Denkmalschutz und Ästhetik zu untersuchen. Dabei sollen für Solaranlagen geeignete Dachflächen unter Gesichtspunkten des Denkmalschutzes und der Integration in das vorhandene (möglicherweise historische) Stadtbild mittels Sichtbarkeitsanalysen auf Basis eines Oberflächenmodells (Laser-DSM) auf ihre tatsächliche Eignung zur Errichtung einer Photovoltaikanlage klassifiziert werden.

Im Vordergrund steht die Entwicklung einer Methode, welche es ermöglicht, die Sichtbarkeit von potentiellen Solarflächen zu untersuchen und nach verschiedenen Kriterien zu bewerten. In die Sichtbarkeitsanalyse sollen digitalisierte Bereiche einfließen, welche nach ihrer Bedeutung für den Denkmalschutz klassifiziert werden. Je häufiger und großflächiger ein potentiell geeignetes Dach von diesen klassifizierten Bereichen aus sichtbar ist, desto schlechter ist die Nutzbarkeitsprognose für Solaranlagen. Somit wird der Datenbestand eines Solarpotentialkatasters um Attribute ergänzt, welche den Denkmalschutz berücksichtigen.

Die Arbeit soll an einem repräsentativen Ausschnitt der Stadt Potsdam erfolgen. Es geht nicht darum, eine großflächige und umfassende Analyse durchzuführen, sondern vielmehr um die Entwicklung einer Methode, die eventuell später Anwendung bei der Stadt Potsdam und andere Gemeinden finden könnte.

1.1 Motivation

Regenerative Energien werden in unserer Welt immer wichtiger, um den wachsenden Energiehunger der Weltbevölkerung zu stillen und gleichzeitig auch den Zielen des Umwelt- und Klimaschutz gerecht zu werden. Besonders seit der Reaktorkatastrophe im japanischen Fukushima sind grüne Technologien zur Energieerzeugung wieder in den Blickpunkt der politischen Entscheidungsträger und auch jedes Einzelnen gerückt.

Bis zum Jahr 2050 wird sich der Energieverbrauch in den Schwellenländern und aufstrebenden Industrienationen wie China, Brasilien und Indien vervielfachen. Weltweit gesehen gehen Schätzungen davon aus, dass es bis zum Jahr 2050 zu einer Verdopplung des jetzigen Energiebedarfs von 500 auf 1000 EJ (1 Exajoule = 10^{18} J) kommen wird (Beringer et al., 2011). Zum Vergleich: Deutschland hatte 2009 einen Primärenergieverbrauch von 14EJ.

Eine Möglichkeit diesen ehrgeizigen Zielen näher zu kommen, ist den Sektor der regenerativen Energien stärker auszubauen und Strom aus Wind, Sonne, Wasserkraft und Biomasse zu erzeugen. Die politischen Grundlagen dafür schaffen auf internationaler Ebene die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und die EU-Klimapolitik (EU-ETS, d.h. das EU-Emissionshandelssystem).

Auf internationaler Ebene spielt die Bundespolitik Deutschland eine wichtige Rolle. Doch auch die Kommunen engagieren sich verstärkt im Klimaschutz und helfen durch Umweltschutz- und Energiesparprojekte bei der Umsetzung nationaler und internationaler Ziele mit.

Die Stadt Potsdam ließ 2010 unter der Federführung des PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) mithilfe eines Konsortiums aus Instituten und Firmen eine Strategie zum Klimaschutz erstellen. Es wurden Konzepte zur Anpassung an den Klimawandel und Einsparung von Treibhausgasen und Emissionen erarbeitet. Zu den ambitionierten Zielen gehört unter anderem, die Kohlendioxidemissionen bis 2020 um 20% gegenüber denen aus dem Jahr 2005 zu senken und bis 2050 nur noch 2,5 Tonnen CO₂ pro Einwohner zu emittieren. (Stadt Potsdam, Integriertes Klimaschutzkonzept, 2010). Dem Klimaschutzkonzept zufolge waren folgende Bereiche bei der Studie von besonderer Bedeutung:

- Wärmekataster (gebäudescharf mit Angaben zum Wärmebedarf)
- Solardachpotenzialanalyse (Beachtung der Belange des Denkmalschutzes)
- Verkehr (Potenzial Elektromobilität)
- Energieerzeugung und -verteilung
- Sowie Stadtplanung, Stadtentwicklung und Öffentlichkeitsarbeit

Die Geschichte Potsdams als ehemalige Preußische Residenzstadt, die Aufnahme der Kulturlandschaft in das UNESCO Welterbe 1990 und die touristische Anziehungskraft als „Schlösser und Gartenstadt“ erfordert eine Einbeziehung des Denkmalschutzes bei der Erstellung und Umsetzung eines Solarpotenzialkatasters. Es sollten weder unter Denkmalschutz stehende Gebäude kategorisch von einer Nutzung durch PV-Anlagen ausgeschlossen werden noch Dächer und Fassaden ohne Prüfung der Denkmalschutzsituation mit Solaranlagen verbaut werden. Oft befindet man sich bei der Beurteilung für oder gegen die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen (kurz: PV) in einer Zwickmühle. Einerseits sollte das historische Erscheinungsbild von Kulturdenkmälern und Stadtvier-

teln erhalten bleiben, andererseits fordert das Staatsziel Klimaschutz den Ausbau der regenerativen Energien und der Klimaschutzbemühungen.

Als Beispiel sei hier das Urteil des VGH Baden Württemberg vom September 2011 genannt. Die Genehmigung für den Aufbau einer PV-Anlage auf der Scheune der Kirchengemeinde St.Urban in Emeringen wurde von der zuständigen Denkmalschutzbehörde zunächst abgelehnt, da sich die „Pfarrscheuer im Ensemble von Kirche und Pfarrhaus befinde, die beide Kulturdenkmale von besonderer Bedeutung seien. Die spiegelnde Glasdachdeckung der Fotovoltaik Anlage beeinträchtige sowohl das Kulturdenkmal als auch die Umgebung über alle Maßen.“ (VGH BW, 2011)

Nach zunächst erfolglosen Widerspruchsverfahren klagte die Kirchengemeinde und das Verwaltungsgericht verpflichtete die Denkmalschutzbehörde den Genehmigungsantrag nochmals zu prüfen. Im Ergebnis entschied das VGH, dass eine PV-Anlage das Erscheinungsbild des Kulturensembles nicht erheblich beeinträchtige, da der „Durchschnittsbetrachter solche Anlagen nicht mehr als exotische Fremdkörper wahrnehme“. (VGH BW, 2011).

Letztlich obliegt die Entscheidung der Denkmalschutz- oder Bauaufsichtsbehörde. Diese muss nun stärker auch das öffentliche Interesse am Ausbau der regenerativen Energien bei der Genehmigung von Solaranlagen berücksichtigen.

Eine objektive Beurteilung ist schwierig und oft nur durch Ortsbesichtigungen möglich. Dabei spielt die Sichtbarkeit des geplanten Dachstandortes eine große Rolle. Ist ein Dach aus der näheren Umgebung gut sichtbar, oder wird es von anderen Gebäuden oder Bäumen verdeckt? Gibt es in der unmittelbaren Nachbarschaft andere Kulturdenkmäler? Diese Fragen fließen in die Entscheidungsfindung mit ein.

In Gesprächen mit Mitarbeitern der Potsdamer Denkmalschutzbehörde wurde deutlich, dass Sichtbarkeitsanalysen und die Einbeziehung der historischen Sichtachsen nach Lenné bei der Beurteilung von PV-Bauanträgen eine wichtige Rolle spielen. Dabei wird meist auf analoge Karten zurückgegriffen oder es werden Besichtigungen vor Ort durchgeführt.

Ziel der vorliegenden Master Thesis ist es, eine Möglichkeit zur besseren Beurteilung der Eignung von Solarstandorten unter besonderer Berücksichtigung des Denkmalschutzes zu erarbeiten.

Exemplarisch dafür sollten zwei, für die Denkmalschutzbehörde besonders interessante Gebiete näher analysiert werden. Alle potentiell für PV Nutzung geeigneten Gebäude

innerhalb dieser Gebiete sollen eine Bewertung unter Denkmalschutzgesichtspunkten erhalten. Diese Arbeit soll die Bearbeiter bei der Entscheidung über eine Baugenehmigung unterstützen.

1.2 Lösungsansatz

Mithilfe der für die Erstellung des Solarpotenzialkatasters benötigten Höhenmodelle können auch die Sichtbeziehungen zu Dachflächen genauer analysiert werden. Verschneidet man die sichtbaren Flächen mit den digital vorliegenden Denkmalschutzkarten, so kann man berechnen, welche Dachflächen von bestimmten Denkmalflächen aus sichtbar sind.

Diese Analyse ist mit GIS Softwareprodukten nach einmaliger Vorbereitung der Eingangsdaten vollautomatisch per Script durchführbar. Für die weit verbreitete Software ArcGIS soll ein Programmablauf entwickelt werden, die es erlaubt, eine Auswahl an PV-Flächen auf ihre Sichtbeziehungen zu Denkmalschutzflächen möglichst vollautomatisch zu analysieren. Die Ergebnisse für jede untersuchte Fläche werden in einer eindeutig zuordenbaren Datei abgespeichert. Nach Möglichkeit soll die Analysemethode auch auf andere Standorte bzw. Städte übertragbar sein.

1.3 Zielpublikum der Master Thesis

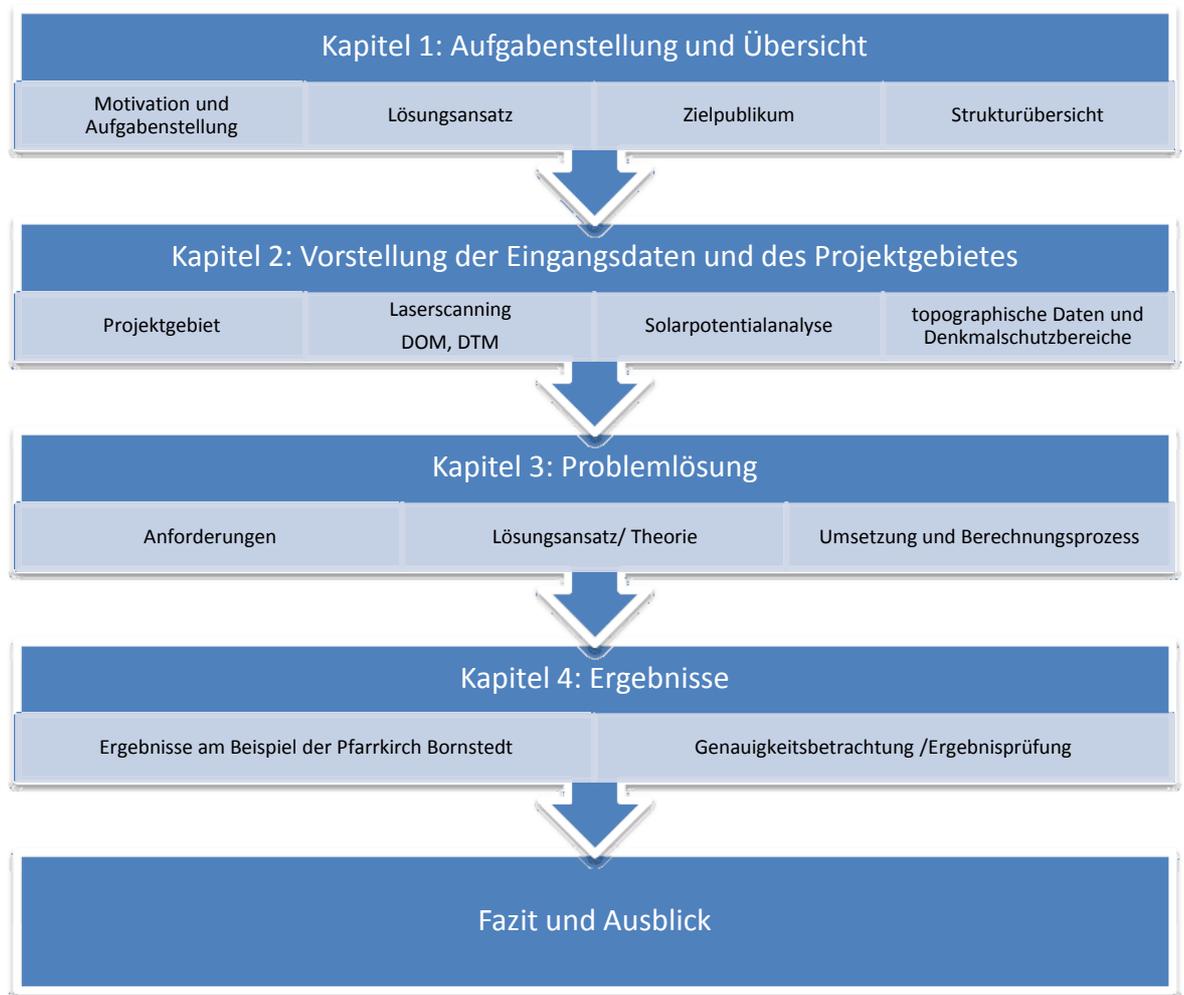
Die Mitarbeiter der Unteren Denkmalschutzbehörde Potsdam sollen mit den gewonnen Analysedaten und Ergebnissen bei der Beurteilung von Baugenehmigungen für PV Anlagen unterstützt werden. Die Master Thesis soll dazu beitragen, eine Vorentscheidung ohne personelle und zeitliche aufwändige Ortsbesichtigungen treffen zu können. Diese Arbeit soll neben Angestellten im Bereich des Denkmalschutzes und der Stadtplanung auch anderen Berufsgruppen einen Einblick in die komplexe Thematik der Sichtbarkeitsanalysen und der Beurteilung von Denkmalschutzbelangen geben.

Insbesondere beim Thema Denkmalschutz und Photovoltaik geraten beide Seiten immer wieder in den Konflikt zwischen Klimaschutzziele und Umweltschutz und dem Bestreben, historisch und kulturell wertvolle Gebäude und Bauensembles auch für die folgenden Generationen zu erhalten. Beiden Seiten möchte ich mit dieser Arbeit eine weitere Entscheidungsgrundlage anbieten.

1.4 Nichtziele der Masterarbeit

Ziel dieser Arbeit ist es nicht zu beurteilen, ob auf einem Dach eine PV Anlage installiert werden kann, oder ob Denkmalschutzrechtliche Belange dagegensprechen. Es soll auch nicht die komplizierte Rechtslage für Genehmigungen von PV Anlagen auf denkmalgeschützten Gebäuden untersucht werden. Das Themenfeld der „denkmalschutzfreundlichen“ Gestaltung von PV Modulen hinsichtlich ihres Aussehens (farbige Module), der Form (Dachziegel-Module) oder der Art der architektonischen Integration in Gebäudedächer- und Fassaden soll ebenfalls nicht untersucht werden und wird nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

1.5 Struktur der Thesis (Flow-Diagramm/ Grafik)



Die Master Thesis gliedert sich in vier Hauptkapitel. In Kapitel 1 wird die Motivation, der Lösungsansatz, Zielpublikum der Arbeit und die Gliederung vorgestellt.

Im zweiten Kapitel werden das Projektgebiet und die Eingangsdaten beschrieben. Der geschichtliche Hintergrund Potsdams und der beiden Testgebiete ist wichtig, um die Motivation hinter dieser Arbeit zu verstehen.

Es folgt die Beschreibung der Entstehungsprozesse der Laserscanningdaten und der daraus hervorgehenden DTM und DSM Daten. Diese bilden die wichtigste Grundlage für die anschließende Sichtbarkeitsanalyse.

Weiter wird die Herkunft und Entstehung der verwendeten Solarpotenzialdaten erläutert und auf das Funktionsprinzip der Solarzelle eingegangen.

Den Abschluss des zweiten Kapitels bildet die Übersicht über die verwendeten Topographischen Karten und Denkmalschutzdaten.

Kapitel 3 bildet den Hauptteil dieser Arbeit und gibt den Arbeitsprozess zur Lösung der zentralen Frage wieder. Hier wird der Entwurf und die Anforderungen an das Lösungsscript erarbeitet und auf die wissenschaftlichen Hintergründe zu einzelnen Prozessen näher eingegangen. Dazu gehört auch ein Exkurs in die Fachliteratur zur Problematik der Sichtbarkeitsanalyse.

Im Kapitel 4 werden die erreichten Ergebnisse anhand eines Beispiels vorgestellt und visualisiert. Den Abschluss bilden die Zusammenfassung und der Ausblick in Kapitel 5.

2. Eingangsdaten und Testgebiet

Das Kapitel gliedert sich in folgende Unterkapitel:

- 2.1 Das Projektgebiet
- 2.2 Laserscanning und Geländemodell
- 2.3 Solarpotentialanalyse
- 2.4 Topographische Karten, Denkmalschutzbereiche

Die Eingangsdaten stammen aus unterschiedlichen Quellen (siehe Tabelle 2-1).

Für die Solarpotentialanalyse wurden Daten eines Laserscanningfluges eingesetzt. Diese Daten liegen in Form einer dichten Punktwolke auf der Geländeoberfläche vor. Das daraus abgeleitete digitale Oberflächen- (DSM) und Geländemodell (DTM) floss in die Sichtbarkeitsanalyse ein. Das DSM bildete die Grundlage für die Berechnung der Solarpotentiale. Die Analyse hierzu wurde von der Firma SunArea in Osnabrück durchgeführt. Ergebnisdaten für zwei Testgebiete standen für diese Master Thesis zur Verfügung. Als weitere Datengrundlage dienten topographische Karten, ALK Daten und Denkmalschutzkarten die von der Stadt Potsdam und der unteren Denkmalschutzbehörde bereitgestellt wurden. Aus einem Bildflug vom Frühjahr 2009 standen Orthophotos des Innenstadtbereichs in unterschiedlichen Auflösungsstufen zur Verfügung.

Eingangsdaten	Format	Beschreibung	Aktualität
Höhenmodell			
DTM	ESRI ASCII Grid (1x1km Kachelung)	0,5m und 2m Rasterdaten der Laserscannerbefliegung, klassifizierte Bodenpunkte	März 2009
DSM		0,5m und 2m Rasterdaten der Laserscannerbefliegung, klassifizierte Oberflächenpunkte	März 2009
Solarpotenzialkataster			
Photovoltaik Photothermie	ESRI Geodatabase (9.3)	Objektshapes der geeigneten Flächen inkl. Attribute (Neigung, Ausrichtung, Eignung für PV-Nutzung,...)	Basierend auf Laserdaten von 03/2009
Denkmalschutz			
Baudenkmäler	ESRI Shape Datei	Historische Gebäude, Wohnhäuser, Schlösser, Flächendenkmäler, ...	März 2010
Denkmalbereiche		Gebiete der Denkmalbereichssatzungen	März 2010
ALK Daten			

Gebäude	ESRI Shape Datei	Schloss, Burg, Aussichtsturm, Kulturgebäude, Freizeitstätten, Wohngebäude,...	März 2010
Nicht-Kataster Gebäude		Gebäude für Freizeit, Erholung, kulturelle Zwecke,...	
Bauwerke		Türme (Schloss-, Wach-, Aussichtsturm)	
Tatsächliche Nutzung		Denkmal, andere hist. Anlagen, Erholungsflächen, Freizeit-, Grünanlagen	
Weitere Topographie		histor. Anlage, Parkanlage, ...	
Open Street Map Daten			
Topografische Daten (nicht verwendet)	ESRI Shape Datei	Gebäude, Straßen, Schienen, Gewässer, Punkte, Plätze, Natur	November 2010
Orthophotomosaik			
Park Sanssouci und nähere Umgebung	TIFF Kachel (2x2km)	10cm Bodenauflösung	März 2009
		18cm Bodenauflösung	
		32cm Bodenauflösung	

Tabelle 2-1

2.1 Das Projektgebiet

In Absprache mit der Unteren Denkmalschutzbehörde der Stadt Potsdam wurden zwei Untersuchungsgebiete für die Eignungsanalyse (siehe Abbildung 2-1) ausgewählt:

- das Gebiet um das Krongut Bornstedt, welches im Norden an den Park Sanssouci grenzt
- im Süden des Parks Sanssouci alle Gebäude bis zur Lennéstraße

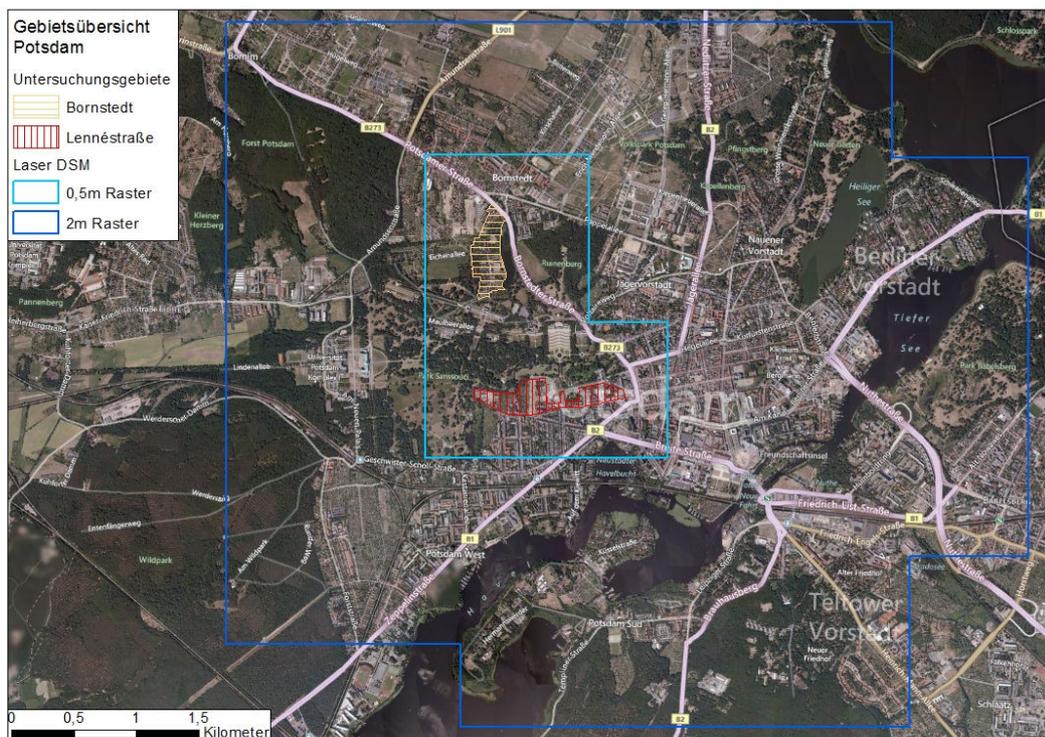


Abbildung 2-1 Übersicht mit den Testgebieten und Laserdaten

Einen Überblick über die historische Entwicklung der Stadt Potsdam und die Bedeutung der Testgebiete wird in Kapitel 2.1.1 und in den folgenden Kapiteln 2.1.2 und 2.1.3 gegeben.

2.1.1 Geschichtliche Bedeutung Potsdams

Die Stadt Potsdam wurde 993 namentlich das erste Mal als „Poztupimi“ in einer Schenkungsurkunde zur Zeit König Otto III erwähnt. Das nächste Mal taucht der Name erst im 14. Jahrhundert auf. Im Jahre 1345 wird das Stadtrecht der damals knapp 1000 Einwohner umfassenden Siedlung erteilt. Bedeutsam wird Potsdam erst im späten 17. Jahrhundert, als Kurfürst Friedrich Wilhelm I. (oft auch „Soldatenkönig“ genannt) die Stadt zu seiner Residenz erklärte. In seiner Regierungszeit als König wird Potsdam zur Garnisonsstadt. Die Straßen, Plätze und die Stadtmauer werden ausgebaut. Es entstehen einige Kirchen (Heiligengeistkirche, Nikolaikirche, Garnisonkirche, siehe Abbildung 2-3), das Jagdschloss, das Große Militärwaisenhaus, eine Stadtschule und die ersten Gebäude des „Holländischen Viertels“. Die Unterbringung der Soldaten in Bürgerhäusern erforderte eine zügige Stadterweiterung in dessen Folge die Freiräume zwischen Brandenburger Tor, Jägertor, Nauener und Berliner Tor geschlossen wurden. Das Holländische Viertel (Abbildung 2-2) wurde im Zuge der zweiten Stadterweiterung erbaut. Es besteht aus 4 Straßenkarrees mit ca. 150 roten Backsteinhäusern im holländischen Stil. Das Viertel war für holländische Handwerker gedacht, die Friedrich nach Potsdam locken wollte. Es ist bis heute das größte geschlossene Bauensemble und Kulturdenkmal im holländischen Stil außerhalb der Niederlande. Die Bevölkerungszahl Potsdams stieg im Jahr 1740 auf 11.708 Einwohner.



**Abbildung 2-2 Holländisches Viertel
(Quelle: Wikipedia)**

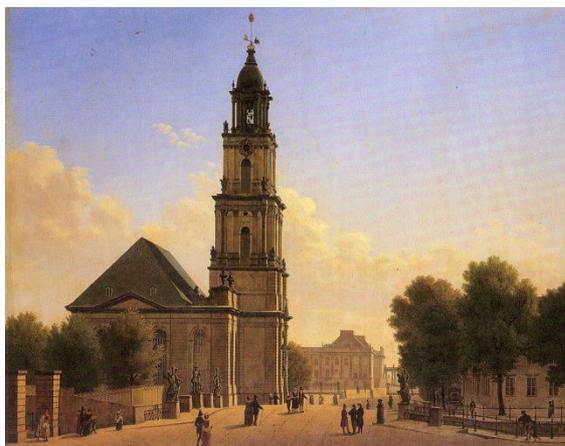


Abbildung 2-3 Garnisonkirche, 1827 Gemälde von Hasenpflug (Quelle: Wikipedia)



**Abbildung 2-4 Belvedere Pfingstberg
(eigenes Foto)**



**Abbildung 2-5 Neues Palais und Commun
im Park Sanssouci (Quelle: Wikipedia)**

Unter Friedrich II. („der Große“) wurde das Schloss Sanssouci nach seinen Skizzen errichtet und das Stadtschloss neugestaltet. Für repräsentative Zwecke und zur Unterbringung von Gästen ließ Friedrich II. ab 1763 das Neue Palais (Abbildung 2-5) im barocken Stil errichten. Einen weiteren Bauschub gab es unter Friedrich Wilhelm IV. Dieser wollte Potsdam in eine herausragende Architektur- und Parklandschaft verwandeln. In seiner Regierungszeit entstanden u.A. die Orangerie im Park Sanssouci, die Friedenskirche, das Belvedere mit seinen Doppeltürmen auf dem Pfingstberg (Abbildung 2-4), das Schloss Cecilienhof (ganzjährige Wohnstätte des Kronprinzenpaares) und 1849 wurde das Schloss Babelsberg fertiggestellt.

2.1.2 Krongut Bornstedt

das Krongut Bornstedt - unter Wilhelm I. ein Rittergut mit Brennerei, Brauerei und Hopfengarten – diente nach einem Umbau durch Häberlin ab 1867 dem Kronprinzenpaar Friedrich Wilhelm IV. und Victoria als Wohnsitz. Später etablierte sich dort ein Künstlerhof mit vielen Schriftstellern und Malern. Auch heute finden im Krongut ganzjährig Veranstaltungen und Ausstellungen statt. Neben dem Krongut ist auch die Pfarrkirche mit dem dazugehörigen 34m hohen Campanile (freistehender Glockenturm) von besonderer historischer Bedeutung. Erbaut wurde sie von 1854 bis 1856 im Auftrag Friedrich Wilhelms IV. nach Entwürfen des Architekten Ludwig Persius. Zum Krongut gehört ein historischer Friedhof auf dem viele historische Persönlichkeiten Potsdams ihre letzte Ruhe fanden.



Abbildung 2-6 Pfarrkirche Bornstedt (Quelle: Wikipedia, Urheber: Karsten Knuth)

2.1.3 Lennéstraße

Die Lennéstraße ist nach Peter Joseph Lenné (1789-1866), einem bekannten preußischen Hofgärtner und Landschaftsarchitekten benannt.

Südlich des Parks Sanssouci schließen sich vorwiegend Wohngebäude und Gärtneranwesen aus der Gründerzeit, also auch der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts an. Der nördliche Teil der Lennéstraße war gegen Ende des 19. Jahrhunderts einer der ersten Siedlungsschwerpunkte in Potsdam. Zunächst siedelten sich hier Handwerker und Kleinbürger an. Das änderte sich erst, als 1888 Kaiser Wilhelm II. das Neue Palais zu seinem Wohnsitz machte und so einen Entwicklungsschub für die Gebiete südlich des Parks Sanssouci auslöste. Für Beamte und Angehörige des Bürgertums entstanden neue herrschaftliche Mietswohnhäuser, welche die vorhandene, lockere Bebauung ergänzten. Als Puffer zwischen den Wohngebäuden und dem Park dienen heute wie damals Gärten, Kleingartenanlagen sowie Obstanbauflächen. Diese erhalten den historischen Charakter des Welterbeparks und sind auch im Bebauungsplan der Stadt Potsdam verankert.

2.2 Laserscanning

Das folgende Kapitel erläutert das Funktionsprinzip des Laserscanning (Kap. 2.2.1) und stellt die Technikkomponenten vor (Kap. 2.2.2). Anschließend wird im Kapitel 2.2.3 auf den Prozess der Datenverarbeitung und auf die Fehlerkorrektur des Laserscanning DTM's eingegangen (Kap. 2.2.4) Diese Informationen sind für das Verständnis der in dieser Master Thesis verwendeten Grundlagedaten wichtig.

Die Technik des Laserscanning wird in der Fachsprache oft auch als ALS (**airborne laser scanning**) oder Lidar (**light detection and ranging**) bezeichnet. ALS ist genauer genommen schon einen Spezialfall unter den drei Haupteinsatzgebieten des Laserscanning:

- Airborne Laserscanning (ALS)
- Terrestrisches Laserscanning (TLS)
- Short Range Laserscanning (Nahbereich-Laserscanning)

Für diese Arbeit wurden ausschließlich Daten aus einem ALS Projekt verwendet, so dass im Folgenden auch nur dieser Anwendungsfall näher erläutert wird. Einen Überblick über die Thematik findet man bei Kraus (2004), Wagner et.al. (2003) und bei G. M. Foody et.al. (2009).

2.2.1 Funktionsprinzip des Airborne Laserscanning

Beim Airborne Laserscanning werden mithilfe von Laserimpulsen punktweise Entfernungsmessungen von Flugzeugen oder Helikoptern aus durchgeführt. Mittels dieser Daten können Gelände- und Oberflächenmodelle abgeleitet werden.

Bei der Messung werden vom Scanner sehr kurze, gebündelte Laserimpulse in Richtung Boden ausgesandt. Je nach Bauart des Lasers werden die Impulse durch sich drehenden oder schwingenden Spiegel mit unterschiedlichen Abtastmustern (Ellipsen, parallele Linien, Zick-Zack Muster) in Richtung Erdoberfläche ausgesendet. Diese werden dann von der Erdoberfläche oder Objekten reflektiert und von einem Sensor registriert. Die Zeitdifferenz zwischen ausgesendeten und empfangenen Impuls gibt Aufschluss über die Entfernung des Objektpunktes. Zusätzlich werden Positionsdaten und die räumliche Lage des Scanners in der Luft mittels GPS und Inertialsystem (IMU) aufgezeichnet und mit den Informationen des Laserscanners synchronisiert. Mithilfe dieser Informationen können räumliche Koordinaten für jeden Bodenpunkt berechnet werden. Dieses Funktionsprinzip ist vereinfacht in Abbildung 2-7 gezeigt.

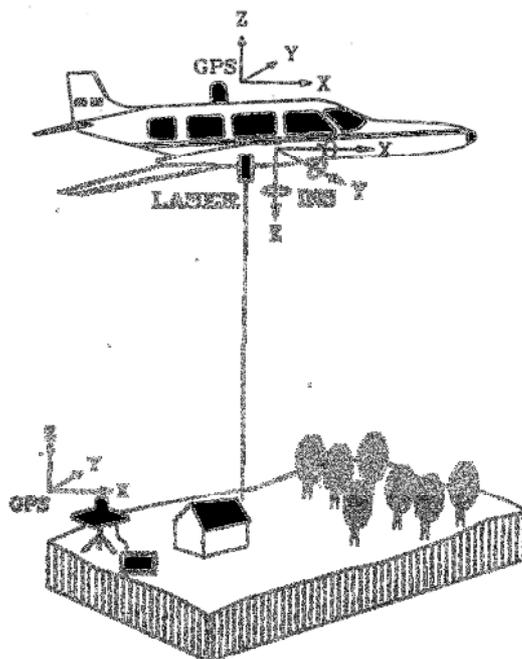


Abbildung 2-7 Laserscanning vom Flugzeug aus (Lindenberger, 2003)

Abhängig von der Objektgröße und dessen Reflexionseigenschaften können pro ausgesendetem Laserstrahl mehrere Antwortechos empfangen werden. Wenn der Durchmesser des Laserstrahls größer als das getroffene Objekt ist (z.B. Hochspannungsleitungen, Blätter und Äste von Bäumen, etc.), wird zunächst nur ein Teil des Strahl zurückgeworfen (First Pulse). Danach können weitere Reflexionen, sogenannte Zwischenecho erfolgen. Der zuletzt empfangene Impuls (Last Pulse) stellt meist einen Bodenpunkt dar (siehe Abbildung 2-8).

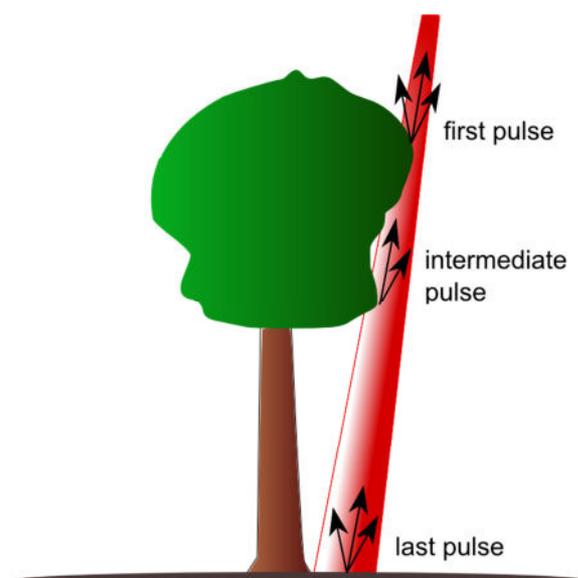


Abbildung 2-8 Reflexionen des Lasers an der Oberfläche (Echos), eigene Darstellung

Zusammen mit der Aufzeichnung der Reflexionsintensität kann aus diesen Informationen später die Klassifizierung der Punkte in Oberflächenpunkte, Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte erfolgen. Vegetation und künstliche Objekte können ebenfalls abgeleitet werden. Diffuse Reflexionen führen mitunter zu groben Fehlern aufgrund von zu langen Laufzeiten/ Entfernungen (multipath und long range errors).

2.2.2 Technische Komponenten des ALS

Im Allgemeinen besteht ein Aerial Laserscanningsystem aus den folgenden Komponenten:

- Laserscanning System mit Sensorkopf und Kontrolleinheit
- DGPS Empfänger zur Positionsbestimmung des Sensors
- Inertiales Navigationssystem (INS, IMU) zur Orientierung des Sensors

Der **Scanner** besteht aus einem Sensorkopf der die Laserimpulse generiert und über eine Optik aussendet. Der zeitliche Abstand der Laserimpulse kann vom Benutzer innerhalb eines bestimmten Rahmens vorgegeben werden. Heute werden meist Gallium Arsenid (GaAs) Halbleiterlaser verwendet, die Licht im Nahen Infrarot Spektralbereich emittieren.

Der Laserstrahl wird von einem rotierenden oder oszillierenden Spiegel oder mittels feststehender Faseroptik (Schnadt, Katzenbeisser, 2004) in Richtung der Erdoberfläche abgelenkt. Für den Empfang der reflektierten Signale ist ein Photodetektor zuständig. Ein vorgeschalteter Filter ist nur für die vom Laser emittierte Wellenlänge durchlässig. Damit wird verhindert, dass störende Strahlung von anderen Quellen empfangen wird. Für die Laufzeitmessung der Laserimpulse wird ein Zeitintervallzähler, der mit einem hochfrequenten Oszillator gekoppelt ist, verwendet. Beim Aussenden eines Impulses wird ein Teil des Strahls vom Sendeteil zum Empfangsteil optisch übertragen und so die Zeitmessung gestartet. Beim Empfang des reflektierten Impulses wird die Zeitmessung gestoppt oder bei Überschreiten der maximalen Reichweite automatisch beendet (falls kein Signal zurückkommt). Ein Mikroprozessor berechnet aus dem gemessenen Intervall die zurückgelegte Strecke und sendet das Ergebnis an einen Datenspeicher. Zusätzlich zur Strecke werden für jeden Impuls auch Informationen zur Intensität, Phase und zu Teilreflexionen (first, intermediate, last pulse) gespeichert.

DGPS steht für differenzielle Positionsbestimmung mittels Globalem Satellitensystem. Das NAVSTAR GPS wurde 1973 vom amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt und ermöglicht eine sehr genaue Positionsbestimmung für einen Empfänger (Rover). Von in der Erdumlaufbahn stationierten Satelliten werden ständig Radiowellen mit codierten Informationen zu ihrer aktuellen Position und der genauen Uhrzeit ausgestrahlt. Der GPS-Receiver kann aus den Signallaufzeiten seine eigene Position auf der Erdoberfläche als Schnittpunkt der Entfernungskegel von mindestens 3 empfangenen Satelliten berechnen (siehe Abbildung 2-9). Da die interne Uhr des Rovers üblicherweise nicht mit der Satellitenuhrzeit synchronisiert ist (Atomuhren) wird ein 4. Satellit benötigt, um die Laufzeitunterschiede exakt berechnen zu können.

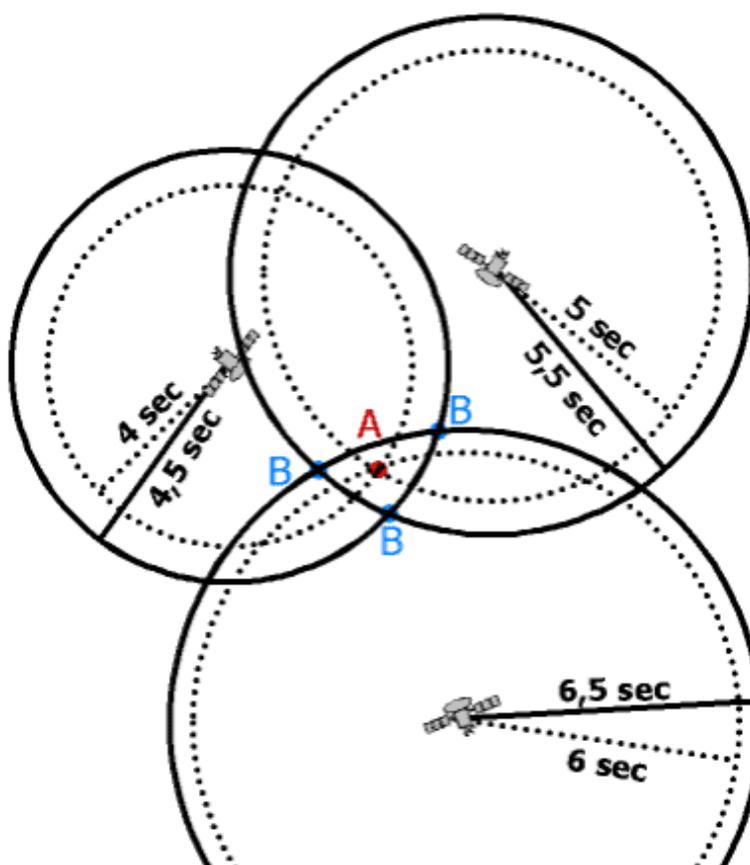


Abbildung 2-9 Positionsbestimmung mit 3 GPS Satelliten (Quelle: kowoma.de)

Für die Positionsbestimmung in Flugzeugen sollte der Empfänger außerdem eine hohe Meßwiederholungsrate aufweisen und zeitgleich möglichst viele Satelliten auf einzelnen Kanälen beobachten. Damit werden Fehler wie Phasensprünge (cycle slips) und Signalunterbrechungen korrigiert und eine Synchronisation zum Laserscanner ermöglicht. Die resultierende Positionsgenauigkeit aus dem GPS System ist abhängig von der Konstella-

tion der empfangenen Satelliten (z.B. schlechte Genauigkeit bei schleifenden Schnitten), und systematisch auftretender Fehler (Einfluss der Atmosphäre, Multipath Ausbreitung, Uhrenoffsets, Empfängerrauschen). Durch die Nutzung einer Referenzstation mit bekannten Koordinaten können Korrekturwerte für einige der systematischen Fehler (außer Multipath Fehler und Empfängerrauschen) berechnet werden. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird somit signifikant verbessert. Empfänger und Referenzstationen sollten nicht mehr als 30km voneinander entfernt sein.

Oft kommt bei einem Laserscanningflug auch ein **INS** System (inertiales Navigationssystem) zum Einsatz. Dieses erfasst mit seinen integrierten Beschleunigungs- und Drehratensensoren alle räumlichen Lageveränderung des Laserscanners welche durch Bewegungen des Luftfahrzeuges verursacht werden. Gemessen werden die Geschwindigkeit, die Bewegungsrichtung (Roll-, Kipp- und Richtungswinkel) und die Zeitdifferenz zur letzten bestimmten Position. Über diese Angaben kann die zurückgelegte Wegstrecke ermittelt und dann in Richtung der Bewegung zur letzten Position hinzuaddiert werden. Somit erhält man eine neue Position des Luftfahrzeugs. Um systematische Fehler zu korrigieren und eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten müssen vor dem Einsatz alle Komponenten als Gesamtsystem kalibriert werden. Die Kalibrierung kann sowohl vor als auch nach der Befliegung des Projektgebietes an Testflächen am Boden, die lage- und höhenmäßig bekannt sind, erfolgen.

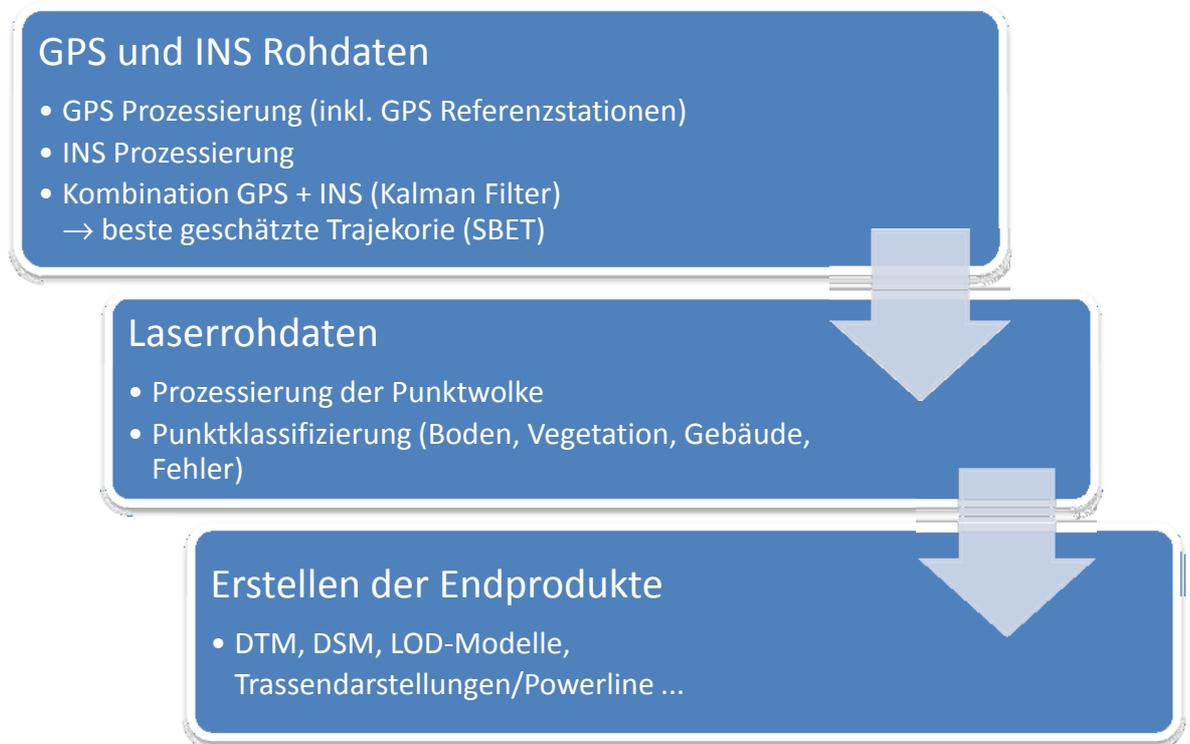
Über die Kombination von GPS und INS kann eine höhere Genauigkeit erzielt werden, als eines dieser Verfahren allein. Vor allem die INS Messungen, die mit einer sehr hohen Frequenz erfolgen (bis zu 200Hz bei Applanix POS AV) können die langsameren GPS Messintervalle von 1-10Hz wirkungsvoll ergänzen.

Bei guten Bedingungen kann man von Standardabweichungen von 5-10cm für flugzeuggestützte Sensoren ausgehen. Für niedrig und langsam fliegende Sensoren (z.B. Hubschrauber) ermittelten Landtwing (2005) und Vosselmann (2008) noch bessere Ergebnisse.

Vertiefende Literatur zur Standortbestimmung mit GPS und INS bieten Bauer (2011) und Wedel (2007).

2.2.3 Datenbearbeitung

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Arbeitsabläufe bei der Prozessierung der Laserscanning Rohdaten.



Für die kinematische **GPS Prozessierung** werden neben den Rohdaten des Rovers im Flugzeug auch die Daten einer oder mehrerer Referenzstationen benötigt. Die Berechnung der Trajektorie erfolgt dabei vorwärts (von Start bis Ende der Mission), und auch rückwärts (Ende bis Anfang). Aus den beiden Lösungen kann man Rückschlüsse zur Qualität ziehen, z.B. wie gut Phasensprünge und –mehrdeutigkeiten gelöst werden können. Um den optimalen Verlauf der Raumlinie zu berechnen, mittelt man die Vorwärts- und Rückwärtslösung.

Die Verknüpfung der GPS und INS Daten erfolgt anschließend mit dem **Kalman Filter** (Kalman, 1960). „Das Kalman Filter ist ein rekursives Filter, das den Zustand eines dynamischen Systems aus lückenhaften und rauschbehafteten Messungen abschätzt.“ (Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung, 2009). Vereinfacht gesagt wird zunächst ein dynamisches Modell für die Lage und Ausrichtung des Sensors simuliert (Systemgleichung mit beschreibenden Zustandsvariablen) und die so berechneten Modellwerte mit den tatsächlichen Aufzeichnungswerten (Messgleichung, in welche die

GPS und INS Messwerten einfließen) verglichen. Die Differenz (Innovation) wird entsprechend der Genauigkeit der Modell- und Messwerte gewichtet und dann statistisch auf Signifikanz geprüft. Wird der Test bestanden, kann die Innovation als Resultat von Mess- und Systemrauschen aufgefasst werden. Sie wird dann als Verbesserung bei der Prädikation des nächsten Systemzustands in die Berechnung einfließen. Für den Fall, dass die Innovation den Signifikanztest nicht besteht, sind wahrscheinlich grobe Fehler die Ursache oder grundlegende Modellannahmen inkorrekt. Beim erfolgreichen Einsatz des Kalman Filters erhält man eine endgültige, beste Schätzung der Trajektorie (engl. SBET). Vertiefende Literatur zur GPS/ INS Prozessierung mit Kalman Filterung bietet Jekeli (2001).

Aus den georeferenzierten Laserrohdaten wird zunächst eine 3D **Punktwolke** für alle gemessenen Impulse abgeleitet. Beim Vergleich der 3D Punkte mit Prüfflächen wie z.B: Fußballfeldern oder anderen ebenen Plätzen und der Vermessung von Dachflächen quer zur Flugrichtung, können systematische Fehler aufgespürt und korrigiert werden. Auch der Vergleich der Punkte in den Überlappungsgebieten zweier Flugstreifen ist zur Fehleraufdeckung hilfreich. Sind alle systematischen Fehler eliminiert und die Qualität der Punktdichte und -verteilung zufriedenstellend, werden die Punkte aller Streifen kombiniert und gegeben falls ausgedünnt.

Im nächsten Bearbeitungsschritt werden die Punkte **klassifiziert**. Meist sind das Unterteilungen in typische Bodenobjekte, die den Laserstrahl reflektieren wie z. B. Vegetation, Gebäude, Brücken, Leitungsmasten und Kabel, Boden. Die Klassifizierung erfolgt aufgrund der sehr großen Datenmenge oft halbautomatisch. Um einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu erreichen, wurden vielfältige Algorithmen und Modelle für diese Aufgabenstellung entwickelt. Genannt seien hier beispielhaft die morphologische Filterung (Vosselmann (2000)), der Ansatz der TIN Verdichtung (Axelsson, 2000) und die robuste Interpolation (Kraus, 1997). Am Ende einer Punktklassifizierung sollte immer eine Qualitätsprüfung stehen. Diese kann visuell mithilfe von 3D-Darstellungen, der Generierung von Profilansichten oder der Ableitung von Höhenlinien erfolgen. Häufig werden auch Luftbilder von Kombibefliegungen (Laserscanner und Luftbildkamera) oder Rasterbilder der Intensitätsdaten als Interpretationshilfe bei der Qualitätssicherung eingesetzt.



Abbildung 2-10 Klassifizierte LIDAR Punkte (Gebäude in Rot, Bäume in Grün und Wasser in Blau), Quelle: Carlberg et al. (2008)

Nach der Klassifizierung aller Punkte können die gewünschten Endprodukte relativ einfach abgeleitet werden. Für ein Digitales Geländemodell werden nur Bodenpunkte verwendet, für ein Oberflächenmodell benötigt man alle First Pulse Punkte. Andere typische Produkte sind Power Line Mapping (3D Situationsaufnahme von Hochspannungstrassen), Baumkronenmodelle für die Forstwirtschaft, die Ableitung von 3D Stadt- und Gebäudemodellen sowie die Ableitung von Hochwasser- und Überflutungsmodellen. Bei Pfeiffer (2003) sind Details zu den Arbeitsprozessen für einige dieser Produkte nachzulesen.

2.2.4 DTM

Um Unklarheiten zu vermeiden, soll hier nur kurz auf die gebräuchlichen Abkürzungen für die Geländemodelle eingegangen werden. In dieser Arbeit werden die englischen Begriffe verwendet:

DEM (engl: digital elevation model) ist ein digitales Höhenmodell und beschreibt die Höhe der Erdoberfläche. Das Koordinatensystem bezieht sich entweder auf geografische Breiten- und Längenangaben oder ist als planimetrisches Referenzsystem definiert. Die Datenstruktur ist nicht näher definiert. Gebräuchlich sind z.B. regelmäßige Raster (GRID), Triangulierte unregelmäßige Dreiecksnetze (TIN), unregelmäßige Punktwolken usw.

DSM (eng: digital surface model) ist eine Unterform des DEM und stellt die Erdoberfläche mit allen darauf befindlichen natürlichen und künstlichen Objekten dar. Im Falle einer Laserbefliegung sind das sämtliche Punkte, die zuerst von

der Oberfläche reflektiert werden. Das DSM kann an den Stellen Ungenauigkeiten aufweisen, die jahreszeitlich bedingten Wachstumseffekten unterliegen (z.B. hohe Feldfrüchte vor der Ernte) oder deren Ausdehnung zu klein für das Raster der jeweiligen Erfassungsmethode ist (z.B. einzelne Bäume, Masten, etc.).

DTM (engl: digital terrain model) ist ein digitales Geländemodell und ebenfalls eine Unterform des DEM, welches nur die Höhen der Geländeoberfläche abbildet. Aufragende Objekte wie Vegetation oder Gebäude sind nicht enthalten. Brücken können, müssen aber nicht Bestandteil des DGM sein. Digitale Geländemodelle sind meist durch Klassifizierung von Bodenpunkten aus DSMs abgeleitet. Oft umfassen DTM auch noch ergänzende Vektordaten (Bruchkanten, Gerippelinien, markante Höhenpunkte). Diese Zusatzdaten sind aber nicht zwingend vorhanden.

Durch die Firma BSF Swissphoto GmbH wurden dem PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) und dem Konsortialpartner SUN-Area die Ergebnisdaten eines Laserscanningfluges im ASCII Format (Rechtswert, Hochwert, Höhe, Echo) als 1x1km Kacheln übergeben.

Zur Datenerfassung wurde ein Laserscanningflug über die Stadt Potsdam durchgeführt und aus den erfassten Daten über Filterungs- und Klassifizierungsmethoden ein hochgenaues Oberflächen- und Geländemodell abgeleitet. Der Projektperimeter umfasst eine Fläche von 188km², die mittlere Punktdichte beträgt 3 Pkt /m² (siehe Abbildung 2-11).

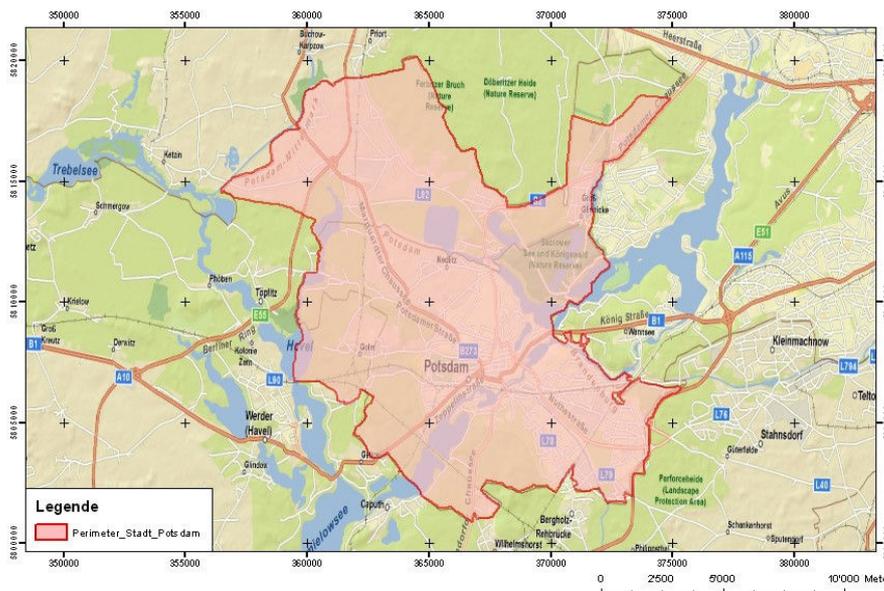


Abbildung 2-11 Projektgebiet Potsdam für den Laserscanningflug (Quelle:BSF Swissphoto)

Der Messflug mit einer Cessna 206 fand an drei Tagen im März 2009 statt. Dabei wurden zwei Optech Laserscanner und ein Applanix Positionierungssystem eingesetzt.

Die Firma SUN-Area nutzte die erzeugten Oberflächenmodelle und 2D Vektordaten der Gebäudeumringe zur Berechnung der Solarpotentialanalyse für die Stadt Potsdam.

Für diese Arbeit wurde ebenfalls das DTM und DSM weiterverwendet. Wie in Abbildung 2-12 erkennbar, traten bei der Visualisierung des DTM in ArcGIS einige grobe Fehler im Datensatz hervor. Diese resultieren aus fehlerhaft klassifizierten Bodenpunkten und haben ihren Ursprung häufig in diffusen Mehrfachreflexionen und „long range errors“. Normalerweise werden Ausreißer bei der Prozessierung der Rohdaten als Fehler erkannt und von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen.



Abbildung 2-12 Schattiertes und coloriertes DTM mit groben Fehlern (rot umrandet)

Die Fehlerkorrektur des DTM erfolgte mit der Software „DT Master“ der Firma Inpho. Dazu wurden die fehlerhaften Bereiche des Höhenmodells im ASCII Format eingelesen und mithilfe von orientierten Stereo Luftbildmodellen manuell korrigiert. Meist handelt es sich bei den fehlerhaften DTM Punkten um Brücken (keine sauberen Kanten) oder Einzelpunkten in tiefen Gruben (z.B. Unterführungseingänge, Kellertreppen, Garagen-einfahrten).

Das fehlerbereinigte DTM steht anschließend als 0,5m und interpoliertes 2m ESRI Raster für die Sichtbarkeitsanalyse bereit. Die Interpolation erfolgte mittels Inverser Distanzgewichtung (IDW). Dabei erfahren nahe Stützpunkte eine höhere Gewichtung bei der Berechnung der Höhenpunkte als weiter entfernte Punkte.

2.3 Solarpotentialanalyse

Dieses Kapitel gibt zunächst einen allgemeinen Überblick über die Solare Strahlung (Kapitel 2.3.1), erläutert die Standortfaktoren und Analysemethoden (2.3.2) und stellt die konkreten Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse (2.3.3) vor.

2.3.1 Solare Strahlung

Als Eingangsdaten für die Einstrahlungsanalyse dienen das Laserflächenmodell und ALK Daten mit den Gebäudeumringen. Für die Strahlungsanalyse wird zunächst die Gesamtsumme aus der Globalstrahlung (Summe aus direkter und diffuser Strahlung) und reflektierter Sonneneinstrahlung ermittelt und anschließend Verschattungen im Nahbereich abgezogen.

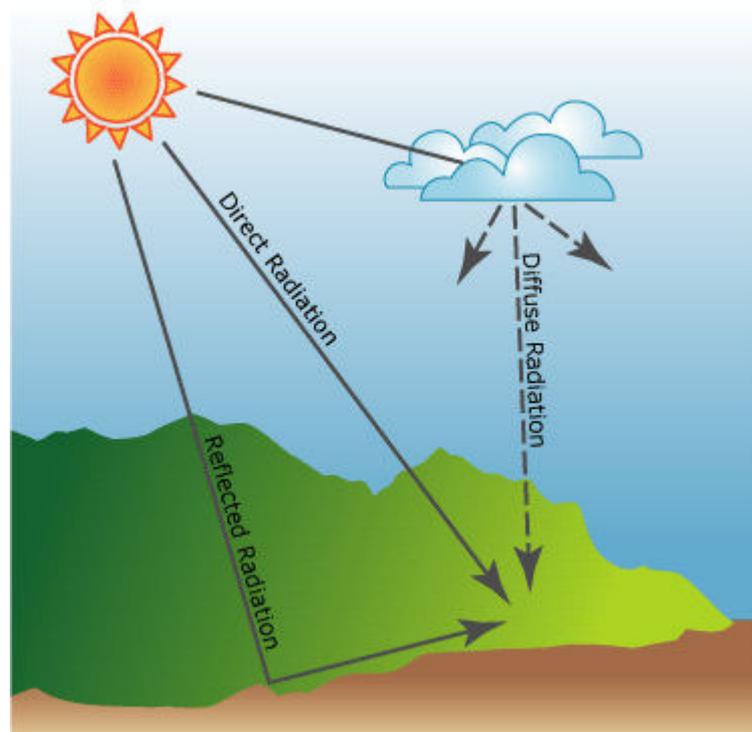


Abbildung 2-13 solare Einstrahlung (Quelle: ESRI)

Im Folgenden werden die Strahlungsarten erläutert, vertiefende Literatur zu diesem Thema ist bei Häberlin (2007) und Hagemann (2002) zu finden.

Wie in Abbildung 2-13 dargestellt, teilt sich die extraterrestrische Strahlung in einen direkten und indirekten Anteil auf. Beim Durchdringen der Erdatmosphäre gehen durch Absorption und Streuung ca. ein Drittel der Gesamtenergie verloren. Die Höhe des Energieverlustes ist abhängig von der zurückgelegten Weglänge durch die Atmosphäre. Daher hat auch die Tages- und Jahreszeit (Einstrahlungswinkel) einen Einfluss auf die direkte Strahlung.

Als direkte, solare Einstrahlung wird definitionsgemäß die Strahlung bezeichnet, welche ohne Umwege direkt aus Richtung der Sonne auf eine Ebene trifft. Sie ist unter anderem von der Lage (geografische Breite), der Ausrichtung und dem Anstellwinkel des Solarmoduls abhängig.

Als diffuse Himmelstrahlung bezeichnet man die Strahlung, die indirekt über Streuung an der Atmosphäre (Wolken, Dunst, etc.) auf eine Ebene trifft. Bei der Berechnung der diffusen Strahlung spielt das Relief und die Ausrichtung (Anstellwinkel, Exposition) des Solarmoduls eine wichtige Rolle. Sie bestimmen den tatsächlichen Horizont und damit die effektiv sichtbare Fläche des Himmelsgewölbes. Bei einer vertikalen Fläche (z.B. Hausfassade) halbiert sich z.B. der Empfang an diffuser Himmelstrahlung. So ist in Deutschland und anderen Nord- und Zentraleuropäischen Ländern der diffuse Strahlungsanteil relativ hoch und beträgt im Winter im Mittel 80% und im Sommer ca. 50% von der Globalstrahlung.

Zusätzlich zur direkten Einstrahlung und der diffusen Himmelstrahlung wird für die Berechnung der Gesamteinstrahlung noch die reflektierte Strahlung hinzuaddiert. Diese entsteht bei der Bodenreflektion und ist abhängig von der Beschaffenheit des Untergrunds (starke Reflektion bei z.B. Beton oder Schnee, geringe bei nassem Erdboden oder Asphalt).

2.3.2 Standortfaktoren und Analyseverfahren

Für die tatsächliche Eignung einer Dachfläche zur solaren Energieerzeugung sind fünf Faktoren besonders wichtig: Globalstrahlung, Dachausrichtung und –neigung, Verschattung und Dachfläche.

Wie in Kapitel 2.3.1 erläutert bestimmt die **Globalstrahlung** die Menge an Strahlungsenergie, die an der Erdoberfläche auf einer horizontalen Fläche empfangen werden kann. Die genauen Strahlungswerte werden vom Deutschen Wetterdienst an mehreren Messstationen erfasst und jeden Tag aufgezeichnet. Diese Daten werden durch METEOSAT Satellitenbeobachtungen ergänzt und für ganz Deutschland über ein 1x1 km Raster interpoliert (DWD, 2012). Im Internet frei verfügbar werden die Daten in Form von Monatsmittelwerten oder als Jahreskarten zur Verfügung gestellt. Als Beispiel sei hier auf Abbildung 2-14 verwiesen, in welcher die mittlere Jahressumme für Deutschland im Zeitraum von 1981 bis 2010 abbildet ist.

Deutlich zu sehen ist das für Deutschland typische Nord-Südgefälle (bedingt durch die Breitenlage und kontinentaleres, wolkenärmeres Klima). Die höchsten Einstrahlungswerte treten in Baden Württemberg und Bayern auf.

Für die Solarpotenzialanalyse von Potsdam wurde der Globalstrahlungswert der Potsdamer meteorologischen Station (52°22'N, 13°05'O, 107m üNN) im 20 jährigen Mittel zu Grunde gelegt. Sie beträgt 1014kWh/ m².

Kennt man den Globalstrahlungswert auf eine horizontale Fläche, so lässt sich mit Hilfe der Dachneigung und –ausrichtung der Einstrahlungswert für eine geneigte Fläche berechnen. Weiterführende Literatur findet man z.B. bei Häberlin (2007) oder Duffie & Beckmann (1991).

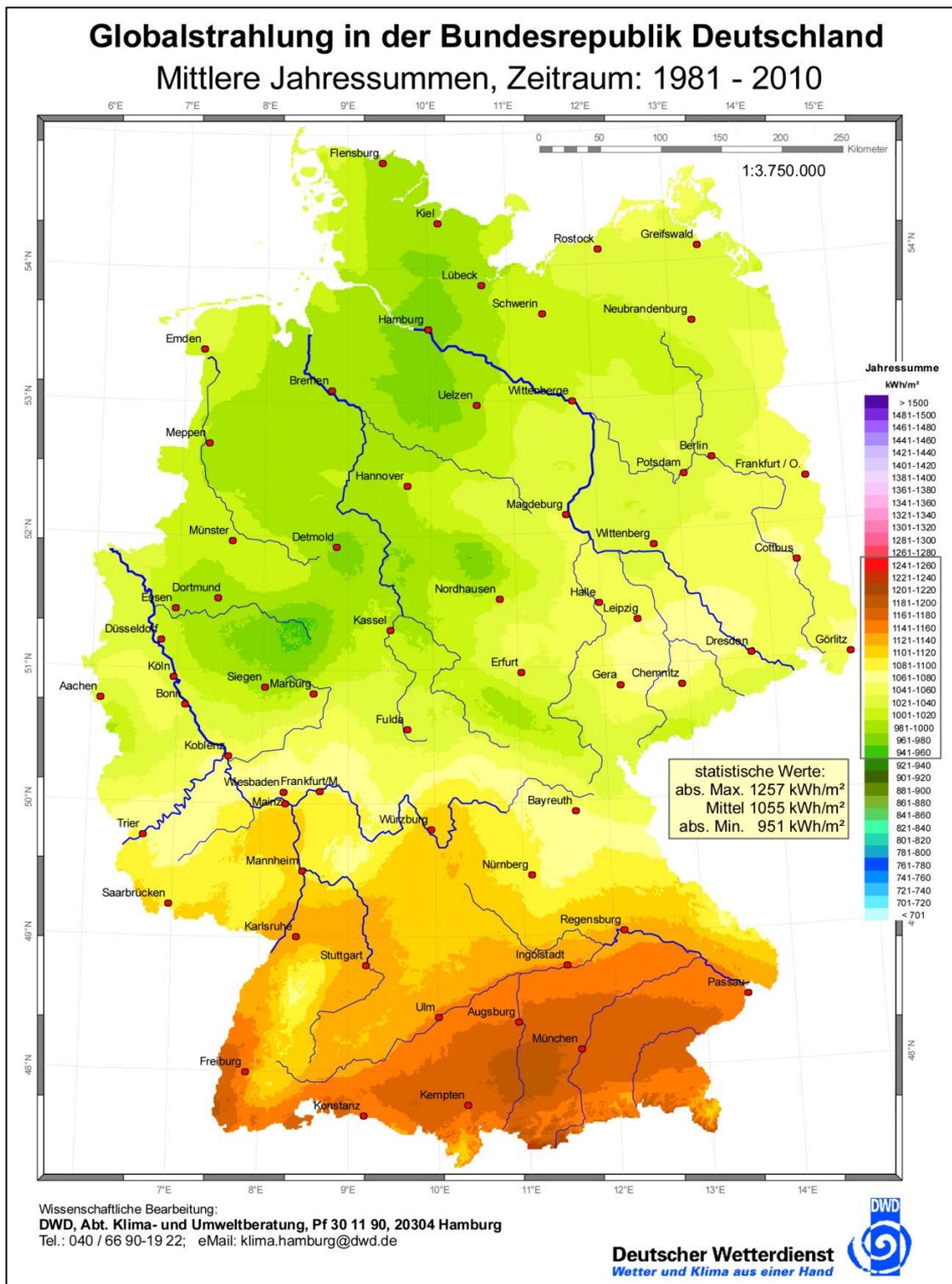


Abbildung 2-14 Karte der Globalstrahlung Jahresmittel von 1981 – 2010 (Quelle: DWD)

Die **Ausrichtung** bzw. Exposition des Daches ist ein weiterer wichtiger Faktor für die Höhe der Energieausbeute. Nach Süden ausgerichtete Dächer sind auf der Nordhalbkugel am besten für die Photovoltaik geeignet. Die Exposition wird für die Dachfläche mit der größten Neigung berechnet. Der Azimutwinkel α bezieht sich dabei auf die Nord-Südachse und wird in Solarstromkreisen oft mit 0° = Südausrichtung angegeben. Es

sind aber auch Winkelangaben von 0° bis 360° (mit 0° = Norden) gebräuchlich. Mit Hilfe von Ertrags-Ausrichtungsschablonen (siehe Beispiel von AS Solar in Abbildung 2-15) kann die theoretisch mögliche Ertragserwartung in Abhängigkeit von der Dachneigung und Ausrichtung für Planungszwecke abgeschätzt werden.

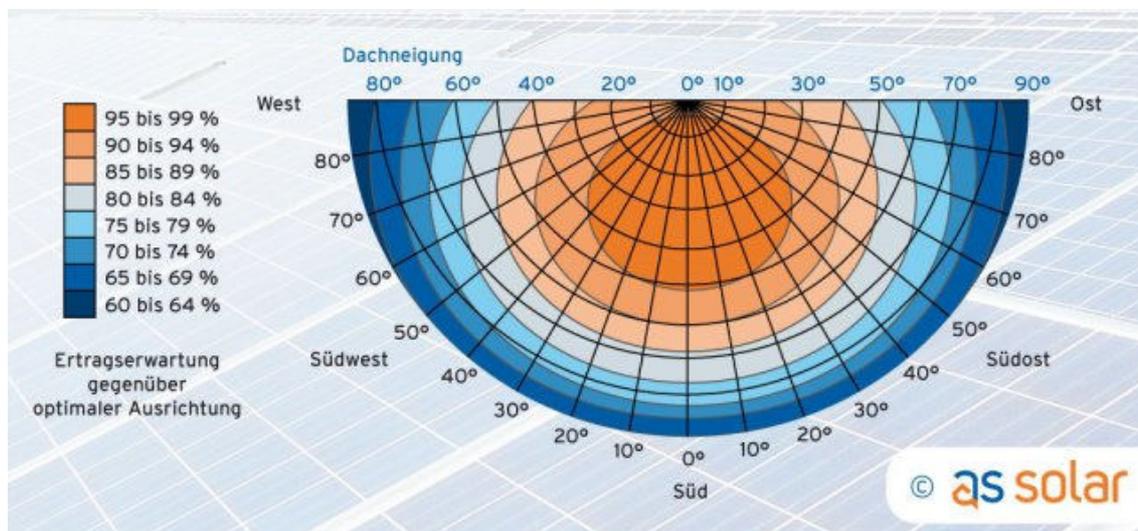


Abbildung 2-15 optimale Ausrichtung und Dachneigung (Quelle: AS Solar)

Die **Dachneigung** ist die bestimmende Größe für den Einfallswinkel der solaren Strahlung. Am effektivsten ist die direkte Sonneneinstrahlung bei einem senkrechten Einfallswinkel. In unseren Breiten ist eine Dachneigung von 37° , kombiniert mit einer Südausrichtung des Daches am besten für die Photovoltaik geeignet (siehe auch Abbildung 2-15). In Deutschland variieren Dachneigungen zwischen $<5^\circ$ (Flachdächer) und $80-85^\circ$ (Kirchturmdächer). Bei Flachdächern wird eine Aufständigung der Module vorgenommen. Dabei kann aber nicht die gesamte Dachfläche genutzt werden, da die Abschattung der Module untereinander einen gewissen Mindestmodulabstand voneinander erfordert. Bei der Installation ist auch zu bedenken, dass ein etwas höherer Anstellwinkel die Selbstreinigung der Module durch Regen erleichtert. Einbußen durch den etwas höheren Anstellwinkel können durch geringere Verschmutzung und damit Leistungsminderung wettgemacht werden. Kleinere Winkel als 20° sollten aus diesen Gründen nicht gewählt werden. Im Winter ermöglicht eine stärkere Neigung auch noch ein problemloses Abgleiten von Schnee.

Eine **Verschattung** der PV Module wirkt sich in der Praxis sehr negativ auf die zu erwartende Energieausbeute aus. Aufgrund der sehr geringen Spannung einer einzelnen Solarzelle (meist $<0,5V$) werden mehrere Zellen innerhalb eines Moduls in Reihe ge-

schaltet. Normalerweise sind auch mehrere dieser Module in einer Reihenschaltung in Strängen (auch Strings genannt) zusammengefasst, um eine höhere Spannung zu erzeugen und somit den Anschluss an das 230V Netz zu erleichtern.

Falls eine Zelle oder ein Modul beschattet wird, produziert sie keinen Strom mehr und verhält sich wie eine Diode in Sperrichtung, d.h. sie leitet keinen Strom. Durch die Reihenschaltung kann nun auch durch alle anderen Zellen im Strang kein Strom mehr fließen. Man spricht dann auch vom „Gartenschlaucheffekt“. Drückt man einen Schlauch an einer einzigen Stelle zu, kann am Ende weniger Wasser herausfließen.

Durch die anderen unbeschatteten Zellen im Strang liegt aber eine Spannung an der Sperrdiode an. Im schlimmsten Fall ist diese Spannung höher als die sogenannte Durchbruchspannung der Diode. Dann erhitzt sich die Zelle und kann irreparabel beschädigt werden (Hotspot Problematik). Um diesem Problem vorzubeugen, werden in modernen Modulen Bypassdioden eingebaut. Trotzdem produziert so ein teilverschatteter Strang deutlich weniger Energie, als dies proportional zum Verschattungsgrad zu erwarten wäre. Die am geringsten bestrahlte Zelle bestimmt also die Effizienz des gesamten Strangs. Um die Verschattungssituation eines PV Moduls schon vor der Installation zu analysieren, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Firma SunArea hat dazu eine Software entwickelt, welche die Sichtbarkeitsbeziehung der Dachflächenpunkte zur Sonne analysiert. Ist die Sichtlinie zu einem bestimmten Sonnenstand unterbrochen wird das Pixel des DSM-Analyserasters als verschattet für die PV Nutzung eingeklassifiziert. Aus den unverschatteten Pixeln eines Daches mit gleicher Neigung und Ausrichtung werden homologe Flächen gebildet und für weitere Berechnung des Solarkatasters ausgewiesen. Weiterführende Information zu diesem Thema kann man bei Ludwig, Klärle und Lanig (2008) nachlesen. Weitere Möglichkeiten mit Teilverschattungen umzugehen zeigen Laschinski und Zanger (2009) sowie ein Vortrag von Vanicek (2011) auf.

Die Größe der verfügbaren und geeigneten **Dachfläche** bestimmt die mögliche Energieausbeute der PV Anlage. Für das Solardachkataster wird eine Mindestgröße von 10m² bei Schrägdächern und 30-40m² für Flachdächer empfohlen. Ab dieser Größe sind rentable Anlagen mit einem Nennwert von 2-3KW_p realisierbar. Bei Flachdächern wird durch die Aufständigung der Module eine höhere Energieausbeute möglich. Um Abschattungen zu vermeiden muss dabei aber ein Mindestabstand der Module zueinander eingeplant werden, so dass effektiv nur ca. 50% der Dachfläche bebaut werden kann.

Abschließend wird über eine Verschattungsanalyse auf Basis des Laser-DSM der Einfluss von Objekten im Nahbereich (z.B. Bäume, benachbarte Gebäude, Dachaufbauten) berechnet und von der Gesamteinstrahlung abgezogen. Erst jetzt kann eine Aussage über die tatsächliche Eignung der Dachfläche für eine Solaranlage erfolgen. Durch die Verwendung der ALK Gebäudeumringe erfolgt die adressgenaue Zuordnung der Analysedaten für die Darstellung in einem Solarpotenzialkataster.

2.3.3 Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse

Die nachfolgende Tabelle Tabelle 2-2 gibt einen Überblick über die wichtigsten berechneten Attribute für das Potsdamer Solarpotenzialkataster:

Attribut	Beschreibung
Neigung des Daches (in Grad)	bei Flachdächern Aufständigung der PV Module nötig, bei zu steiler Dachfläche geringere Ausbeute an direkter Solarstrahlung
Dachfläche	Mindestgröße von 10m ² Dachfläche bzw. 40m ² bei Flachdächern
Globalstrahlung (%)	Möglicher prozentualer Einstrahlungsanteil an Globalstrahlung für das analysierte Dach
Ausrichtung (in Grad)	nach Süden ausgerichtete Dächer sind effizienter, Abweichungen von 20-30° haben noch keine allzu große Reduktion der Energieausbeute zur Folge (Werte von 0-360° mit 0° = 360° = Nordausrichtung)
Modulfläche	Gesamtfläche der möglichen installierbaren PV Module
KW Leistung	Potenzielle kW Leistung für PV Anlage (ausgehend von Nennleistung von 7m ² /kW)
Eignung	Eignung der Dachfläche für PV/TH Nutzung mit den Klassen: <ul style="list-style-type: none"> - sehr gut geeignet, d.h. >95% nutzbare solare Einstrahlung in Potsdam - gut geeignet, 80-95% der nutzbaren solaren Strahlung - bedingt geeignet, 75-80% der nutzbaren solaren Ungeeignete Dächer sind im Kataster nicht aufgeführt.

Tabelle 2-2

Die Daten wurden in Form von zwei ESRI Shape Dateien großräumig für das Untersuchungsgebiet zur Verfügung gestellt. Die Datei „SolarpotPotsdamPVend.shp“ enthält die Ergebnisse der Potenzialanalyse für eine Nutzung mittels Photovoltaikanlagen (PV). In der Datei „SolarpotPotsdamTH.shp“ sind die Potenzialdaten für die Thermische Nutzung (TH) abgelegt. Die Shape Dateien beinhalten potenziell geeignete Dachflächen in Form von Polygonen und ihre zugehörigen Attribute. Im folgenden Ausschnitt (Abbildung 2-16) sind beispielhaft die Metadaten der PV-Analyse für eine Dachfläche des Bornstädter Pfarrhauses dargestellt und mit einem Orthophoto hinterlegt.

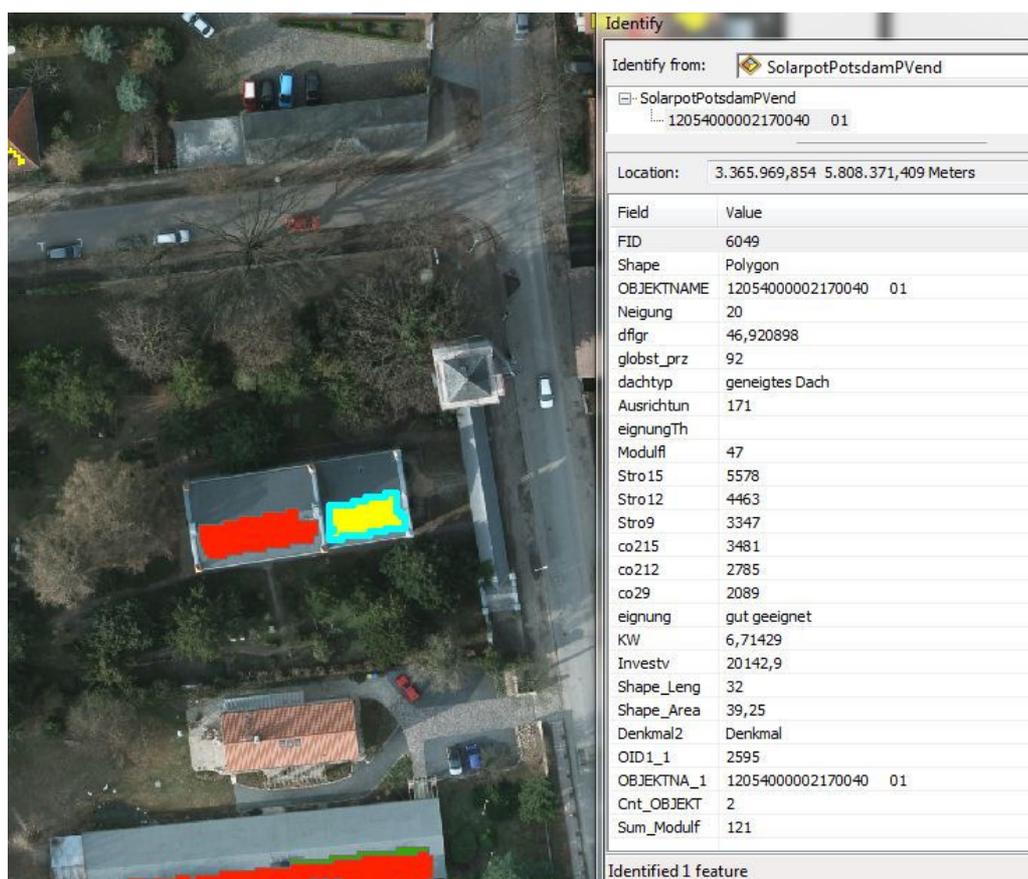


Abbildung 2-16 PV-Attributtabelle für das Bornstädter Pfarrhaus (türkis umrandet)

2.4 Topographische Karten, Denkmalschutzbereiche

Die Stadt Potsdam stellte für die Bearbeitung dieser Master Thesis verschiedene topographische Karten bzw. Datensätze zur Verfügung. Diese umfassen Daten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK, Stand 10/2010) sowie frei nutzbare Open Street Map Daten (OSM). Beide Datensätze wurden im ESRI Shape Format bzw. als ESRI Geodatabase bereitgestellt. Die Denkmalschutzbehörde steuerte Denkmalschutzkarten (Stand 26.03.2010) ebenfalls im ESRI Format bei.

Nach der Sichtung wurden die in Tabelle 2-3 aufgeführten Dateien für die weitere Bearbeitung verwendet. Der OSM Datensatz wurde nur zu Übersichtszwecken aber nicht für die Analyse verwendet, da zum einen die geometrische Genauigkeit unbekannt, als auch der Inhalt und Umfang der Metainformationen sehr inhomogen und unvollständig ist.

Dateiname	Datensatz	Geometrie	Inhalt
Bauwerke_05	ALK	Polygon	Türme (Schloss-,Burg-, Aussichtstürme,...)
Gebaeude_05	ALK	Polygon	öffentl. teils bedeutsame Gebäude (Theater, Schloss, Museum,...), andere Gebäude (Wohnhäuser, Wirtschaft- und Industriegebäude)
NichtKatasterGebaeude_05	ALK	Polygon	Nicht katastermäßig erfasste Gebäude (Veranstaltungsgebäude, Bibliotheken, Freizeitgebäude, Gartenhäuser, Schuppen, kl. Gebäude, Garagen,...)
TatsaechlicheNutzung_05	ALK	Polygon	Nutzungsarten (Industrie, Erholung, Wohnen, Abfall, Grünanlagen, Erholungsflächen, Freizeit, Denkmal, historische Anlagen,...)
WeitereTopografie_05	ALK	Polygon	Wege, Straßen, Plätze, Gärten, Friedhof, Parks, Flüsse, Seen, Lagerplatz,...)
Baudenkmale (Stand2010/03/26)	Denkmalschutz	Polygon	Baudenkmale (Gebäude, Siedlungen, Parks, Plätze)
Denkmalbereiche (Stand2010/03/26)	Denkmalschutz	Polygon	UNESCO Gebiet und städtische Schutzgebiete

Tabelle 2-3

Die digitale ALK Brandenburg ist zum größten Teil durch Digitalisierung der analogen Liegenschaftskarte entstanden und weist dadurch keine hohe geometrische Genauigkeit auf. Die Lagegenauigkeit der Gebäude (Bauwerke_05, Gebaeude_05 und NichtKatasterGebaeude_05) ist um einiges besser und liegt bei ca. 0,4-0,8m (Quelle: LGB). Die Gebäudeumringe beziehen sich auf die Gebäudeaußenmauern, der Dachüberstand ist nicht berücksichtigt.

Die zur Verfügung gestellten Daten der Denkmalschutzbehörde zeigen das UNESCO Weltkulturerbe sowie weitere städtische Schutzgebiete (Abbildung 2-17)

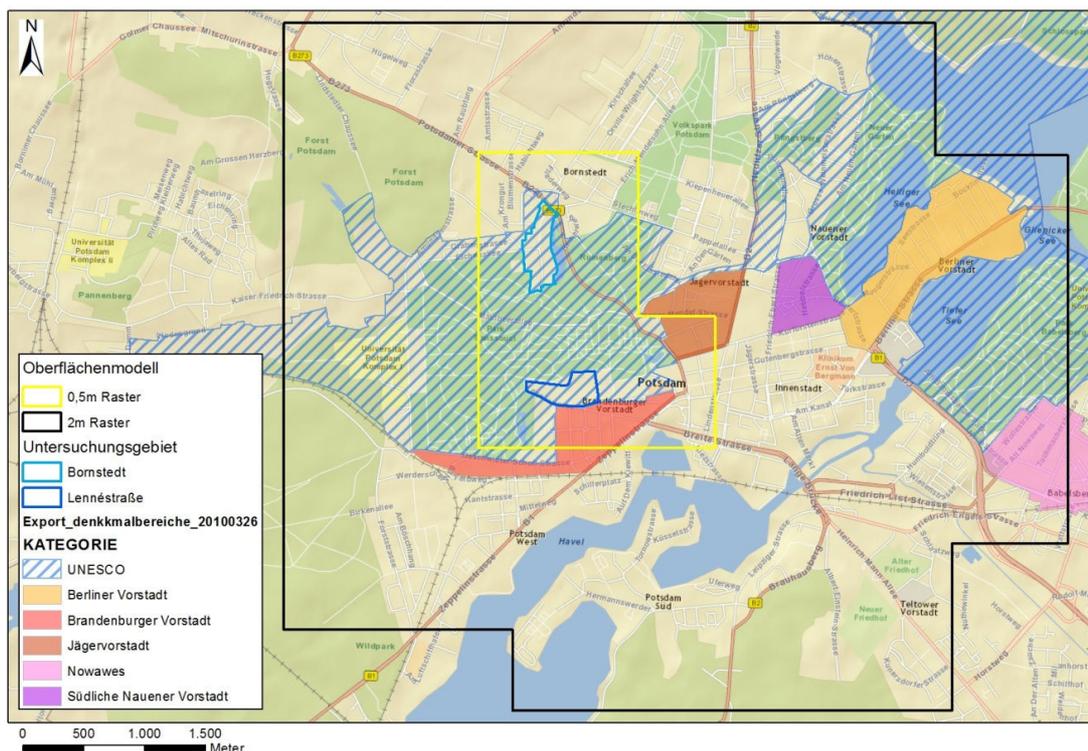


Abbildung 2-17 Denkmalschutzbereiche im Projektgebiet Potsdam

Die denkmalgeschützten Gebiete umfassen ganze Stadtviertel und decken einen Großteil der Stadtfläche ab. In Tabelle 2-4 sind die wichtigsten Denkmalsbereiche und ihre Flächenausdehnung aufgelistet. Das größte Gebiet, das UNESCO Weltkulturerbe, erstreckt sich auf 13,43km² und beinhaltet neben dem Schlosspark Sanssouci auch die barocken, planmäßig angelegten Straßen- und Wege mit ihren Sichten und Ausblicken. Ebenfalls eingeschlossen ist der Neue Garten mitsamt dem Pfingstberg und den Uferbereichen des Heiligen Sees, der Park Babelsberg, die Russische Kolonie Alexandrowka, das Krongut Bornstedt, der Sacrower Park mit Teilen des Jungferensees, Teile der Nauener Vorstadt (Mirbachwäldchen), der Park und das Schloss Lindstedt, die Lindenallee am Neuen Palais, Klein Glienicke, angrenzende Gewässerbereiche (Havel, Heiliger See, Jungferensee, Tiefer See) und der Voltaireweg als historische Verbindungsstraße zwischen Park Sanssouci und Neuem Garten. Detaillierte Beschreibungen der Flächen können der Denkmalsbereichssatzung (1996) entnommen werden. Dort sind auch alle geschützten Einzeldenkmale aufgelistet.

Denkmalsbereichssatzung	Fläche (ha)
UNESCO	1343,08
Berliner Vorstadt	92,03
Brandenburger Vorstadt	50,11
Jägervorstadt	37,83
Nowawes	82,42
Südliche Nauener Vorstadt	24,86

Tabelle 2-4

Anmerkung zur Rechtslage und Prüfverfahren von PV Anlagen

In Deutschland liegen für die Bundesländer keine einheitlichen inhaltlichen Formulierungen vor, welche die Rechtslage für Genehmigungen von Solaranlagen an Denkmälern regeln. Es kann aber allgemein abgeleitet werden, dass Solaranlagen einer denkmalrechtlichen Genehmigung bedürfen, wenn:

- das Erscheinungsbild oder die Bausubstanz eines Denkmals verändert wird
- durch die Installation einer Solaranlage die nähere Umgebung des Baudenkmals bzw. die landschaftsprägende Bedeutung des Denkmals negativ beeinträchtigt wird
- sich die Baumaßnahme in den Geltungsbereich städtebaulicher Denkmäler, ausgewiesener Denkmalbereiche oder Ensemble erstreckt

Bei folgenden Kriterien ist eine PV Anlage meist genehmigungsfähig:

- die Fläche der Kollektoren ist auf ein notwendiges Mindestmaß beschränkt
- die Module werden in einem unauffälligen, nicht öffentlich einsehbaren Bereich installiert
- die technische Anlage fügt sich in ihrem Erscheinungsbild unauffällig in die bestehende Architektur ein (Farbe, Form und Größe der Module)
- die Anlage wird auf einem untergeordneten Nebengebäude des Denkmals montiert und beeinflusst das Erscheinungsbild des Denkmals nicht in erheblichem Maß
- es gibt keinen alternativen Standort und der Betrieb der Anlage dient der primären Energieversorgung des Denkmals

Die Einzelfallprüfung von Genehmigungen wird durch die Denkmalschutzbehörde nach Landesrecht durchgeführt.

3. Lösungsscript

Das folgende Kapitel gliedert sich in drei Teilbereiche auf. In 3.1 werden die Anforderungen an die Lösungsmethode erläutert. Kapitel 3.2 widmet sich dem theoretischen Hintergrund, erläutert den Begriff der Sichtbarkeitsanalyse und gibt einen Überblick über den Stand der wissenschaftlichen Forschung. Im Unterkapitel 3.3 wird die praktische Umsetzung und der Berechnungsprozess des entwickelten Lösungsscriptes beschrieben.

3.1 Anforderungen

Für die Erarbeitung einer Lösungsstrategie ist es wichtig, sich zunächst ein Bild über die Anforderungen an das Lösungswerkzeug zu machen. Einen schematischen Überblick über diese Anforderungen gibt die nachfolgende Abbildung 3-1.

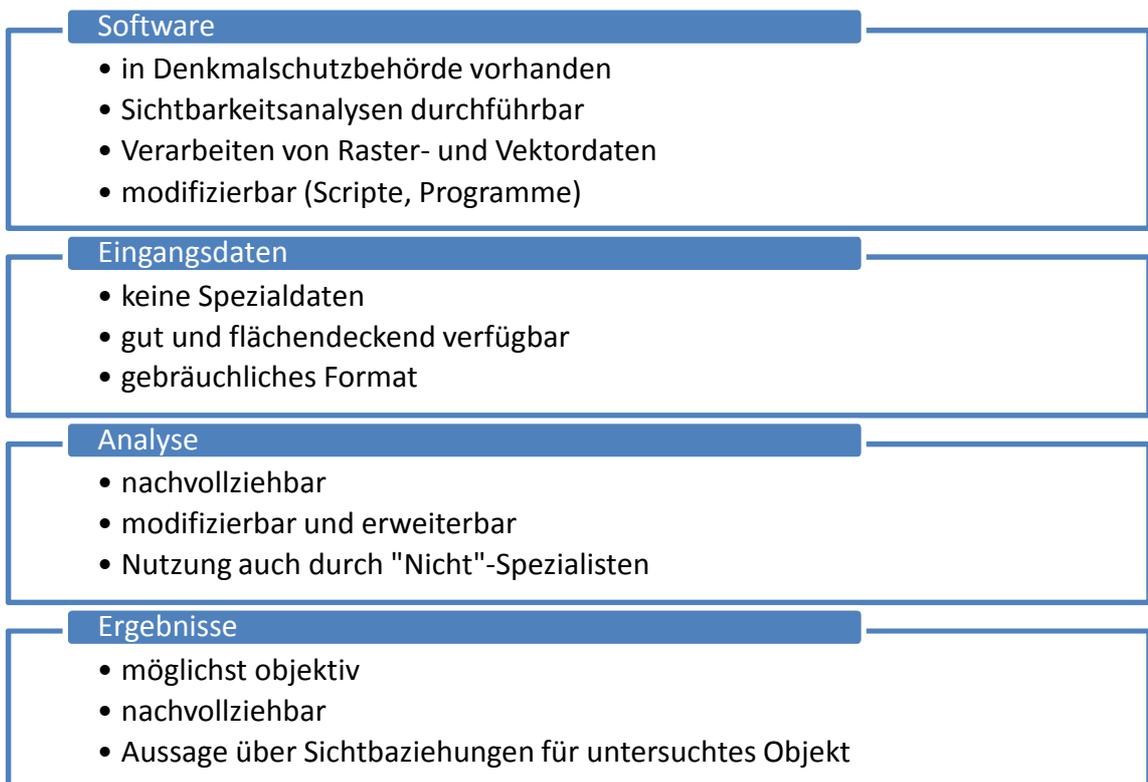


Abbildung 3-1 Anforderungsschema für das Lösungswerkzeug

Eine Hauptbedingung ist die Nutzung einer weit verbreiteten Software, die z.B. den Bearbeitern der Denkmalschutzbehörde innerhalb ihrer Behörde eigene Analysen ermöglicht. Basierend auf den Anforderungen wurde als Software ArcGIS der Firma ESRI gewählt, welche auch bei der Denkmalschutzbehörde zum Einsatz kommt. Diese GIS Software hat den Vorteil, dass sie bereits viele Werkzeuge (Tools) zur Geodaten-

analyse bietet und sich durch Scripte ergänzen lässt. Dadurch lassen sich komplexe Arbeitsabläufe programmieren oder vorhandene Werkzeuge kombinieren und ergänzen. ArcGIS unterstützt in der Version 10 die Scriptsprache Python. Diese ist eine leistungsstarke, einfach zu erlernende Open-Source Programmiersprache.

ArcPy, auch ArcPy Site Packet oder Bibliothek genannt, ermöglicht den einfachen Zugriff auf Funktionen, Klassen und Module der ArcGIS Geoverarbeitungswerkzeuge mittels Python.

Python hat außerdem den Vorteil einer weltweit sehr großen Nutzergemeinde, die sich sehr rege in Foren, Blogs und Arbeitsgruppen austauscht. Online Kurse im Virtual Campus bieten Einsteigern und Fortgeschrittenen die Möglichkeit, sich in verschiedene Themenbereiche selbständig einzuarbeiten.

Die verwendeten Eingangsdaten wie DSM, Solarkataster und Denkmalflächen sollten für möglichst viele Städte und Gemeinden vorhanden sein. Da heutzutage Laserscanningflüge von den Landesvermessungsämtern regelmäßig durchgeführt bzw. beauftragt werden, können sie sehr gut zur Ableitung von Oberflächenmodellen genutzt werden. Immer mehr Gemeinden in Deutschland erheben diese Daten, um Solarpotentialkataster zu erstellen.

Das Ergebnis der Analyse sollte eine objektive Beurteilungsgrundlage für Solarstandorte liefern und z.B. denkmalgeschützte Häuser nicht von Anfang an aus kategorisch ausschließen. Vielmehr sollen die Ergebnisse in Form von zusätzlichen Objektattributen für jedes Dach die Anzahl und Umfang der Sichtbeziehungen zu denkmalschutzrelevanten Flächen in der Umgebung wiedergeben. Es soll auch eine geometrische Visualisierung der Sichtflächen in Form von Karten oder Speichern der Ergebnisflächen als eigene Shape-Datei möglich sein.

Eine verständliche und nachvollziehbare Dokumentation des Lösungsweges bzw. des Softwarescriptes, die z.B. eine spätere Weiterentwicklung ermöglicht, ist ebenso wichtig.

3.2 Idee/ Theorie

Mithilfe der vorliegenden Daten (Höhenmodell, Solarpotentialanalyse und topographische Karten bzw. Denkmalschutzflächen) soll eine Beurteilung über die Sichtbarkeit von möglichen PV Standorten unter Denkmalschutzgesichtspunkten erfolgen. Für jede potenziell für die Solarnutzung geeignete Dachfläche ist das Sichtfeld aus der Perspek-

tive eines Fußgängers zu berechnen. Weiterhin soll es eine Aussage geben, ob das Dach von denkmalschutzrelevanten Flächen aus sichtbar ist.

Für diese Art der Untersuchung bietet sich eine Sichtbarkeitsanalyse an.

3.2.1 Begriff der Sichtbarkeit

Die Sichtbarkeit ist ein optisches Phänomen und beschreibt für einen ausgewählten Standpunkt, ob ein Objekt für den Beobachter wahrnehmbar ist. Natürliche Faktoren wie die Lage des Betrachterstandpunktes, die vorherrschenden Lichtverhältnisse und die physikalischen Eigenschaften (Größe, Form, Farbe) und die Entfernung bis zum Objekt haben einen Einfluss auf die Sichtbarkeit. Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge ist die Sichtbarkeit mathematisch nur schwer modellierbar und wird daher anhand vereinfachter digitaler Modelle untersucht. Licht- und Wetterverhältnisse (z.B. Tageszeit, Sonnenstand, Niederschlag, Nebel) und Materialeigenschaften (Farbe und Größe) bleiben dabei in der Regel unberücksichtigt.

Einen großen Einfluss hat die Höhe des Betrachterstandpunktes. Zusammen mit der Erdkrümmung bestimmt sie die Entfernung bis zum Horizont und damit die Größe des potenziell sichtbaren Gebietes. Sichthindernisse wie Berge, Vegetation oder Gebäude verkürzen den effektiven Horizont und schränken die „Sicht“ ein.

3.2.1.1 Sichtbarkeitsanalyse

In heutigen GIS Systemen gehört die Sichtbarkeitsanalyse zu den Grundfunktionen. Turner et. al.(2001) gibt einen umfangreichen Überblick auf Analysemethoden und Anwendungsbereiche. Genannt seien hier nur einige Themengebiete wie die Planung für Richtfunkmasten (Goodchild et.al., 1989 sowie Lee, 1991) und Windparkanlagen (Kidner 1996, 1997), die Visualisierung von archäologischen Orten (Wheatley, 1995), Sichtbarkeitsanalysen im Tourismus (Shellito et. al., 2004), usw.

Bei De Florian und Magillo (1994, 2003) werden verschiedenste Problemstellungen bei Sichtbarkeitsanalysen und entsprechende Lösungsalgorithmen vorgestellt. Neben Funktionen für gerasterte Modelle (GRID) werden auch etliche Algorithmen für Triangulierte Dreiecksnetze (TIN) aufgezeigt.

Als vielversprechend in Hinsicht auf Rechenzeitoptimierung und effizienter Datenspeicherung der meist sehr großen Höhenmodelldaten erweisen sich „Multiresolutions“-

Geländemodelle. Diese halten die Daten in verschiedenen Auflösungsstufen bzw. Hierarchien vor (De Floriani et.al., 1998 und Hoppe, 1998).

Im Folgenden sollen die zwei wichtigsten Werkzeuge der Sichtbarkeitsanalyse näher erläutert werden:

- die Sichtbarkeitsanalyse von zwei Punkten (mittels Sehstrahl bzw. LOS)
- die Analyse der von einem oder mehreren Betrachterpunkten aus sichtbaren Fläche (Viewshed, Sichtkarte)

Die mathematische Untersuchung, ob ein Punkt A von einem anderen Punkt A' aus sichtbar ist, wird **Sichtbarkeitsanalyse** genannt. Dabei wird eine Gerade durch den Betrachterpunkt und den Zielpunkt gelegt. Diese bildet den sogenannten **Sehstrahl** (engl.: line of sight, kurz: LOS). Liegt die Gerade in ihrer gesamten Länge über der Geländeoberfläche und wird nicht vom DSM unterbrochen, so besteht eine Sichtverbindung zwischen den beiden Punkten. Vor dem Beginn des Computerzeitalters wurde die Sichtlinie durch die graphische Konstruktion des Geländeprofiles zwischen Punkt A und A' untersucht (siehe Abbildung 3-2).

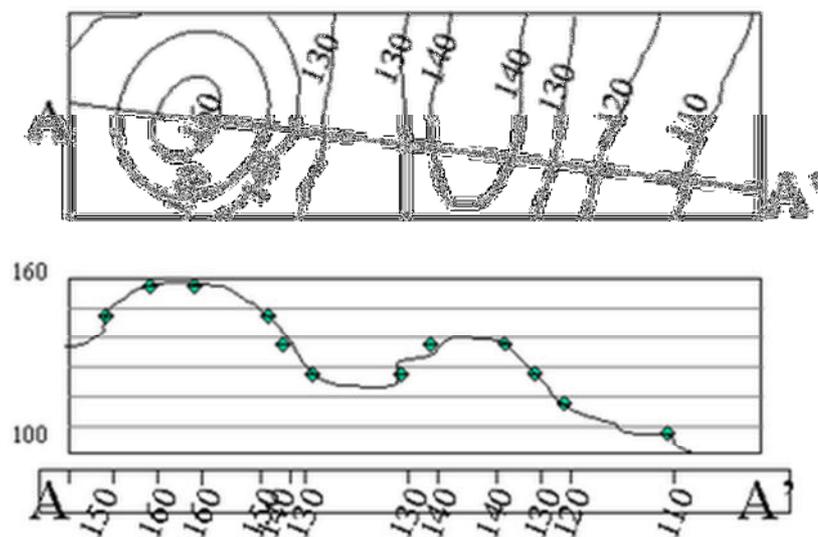


Abbildung 3-2 Konstruktion eines Geländeprofiles
(Quelle: www.earthscience-longoria.blogspot.de)

Benötigt wurde eine Gebietskarte mit Höhenlinien und ein Streifen Papier. Beide Punkte werden auf der Karte mit einer Profil-Linie verbunden und an diese die Kante des Papierstreifens angelegt. Alle Schnittpunkte der Höhenlinien werden nun auf den Rand des Papierstreifens übertragen und mit der jeweiligen Höhenangabe versehen. Auf einer

vertikalen Höhenskala (beginnend mit dem kleinsten vorhandenen Z-Wert) wird für jeden Schnittpunkt der Höhenwert eingetragen. Abschließend verbindet man die Höhenkoten mit einer Kurve und erhält so das Höhenprofil entlang der Sichtlinie A-A´.

Heute wird diese Art der Analyse mit digitalen Daten am Computer durchgeführt. Dabei gibt es verschiedene mathematische Ansätze. Einige Techniken sind bei Fischer (1993) erläutert, dieser geht auch auf unterschiedliche Ergebnisse bei Berechnungen mit verschiedenen Analysealgorithmen ein.

Der Basisalgorithmus errechnet die horizontalen Schnittpunkte der LOS mit dem DTM Raster. Für diese Schnittpunkte wird die Höhe des DTMs mit der berechneten Höhe der LOS an diesem Punkt verglichen. Ist die DTM Höhe größer, so ist die freie Sicht auf den Zielpunkt verdeckt, ist die Höhe geringer, so springt die Funktion zum nächsten Schnittpunkt und fährt dort mit dem Höhenvergleich fort. Als mathematische Grundlage dienen Fischer fünf verschiedene Ansätze, die entweder auf den Winkelsätzen eines rechtwinkligen Dreiecks bzw. auf dem Strahlensatz beruhen (siehe Abbildung 3-3). Für den Fall, dass das Ziel **C** höher als der Betrachter **A** liegt und folgende Bedingungen wahr sind:

Wenn $AD > AE$ oder $DF > EF$ oder $AC/BC > AE/FE$

sowie Winkel $ACB < AEF$ oder Winkel $BAC > FAE$

dann gilt: der Punkt **C** ist von **A** aus **sichtbar**, ansonsten ist C von A aus nicht sichtbar.

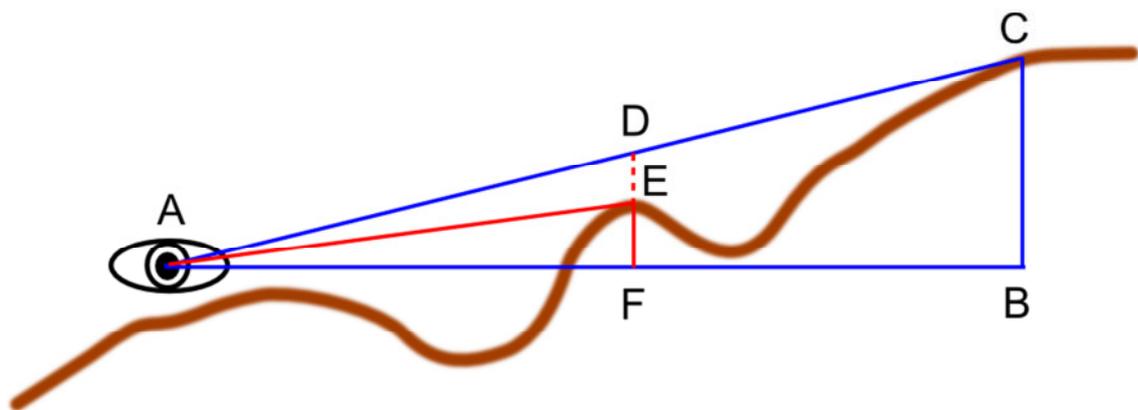


Abbildung 3-3 fünf verschiedene Methoden zur Höhenbestimmung nach Fischer (eigene Darstellung)

Fischer schreibt auch, dass die messbare und logische Verifizierung der Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse im Feld sehr schwierig bis unmöglich ist. Grund sind Einflüsse

von atmosphärischer Refraktion, Erdkrümmung, Vegetation und Fehler im Höhenmodell, die einen großen Einfluss auf die tatsächliche Line of Sight eines Beobachters hat. Die Ermittlung der Fläche, welche von einem Punkt aus sichtbar ist, wird **Viewshed**-Analyse genannt (siehe Abbildung 3-4). Ein Viewshed (übersetzt „Sichtbereich“) erscheint in der Literatur oft auch als ZVI (engl.: zone of visual influence) oder „Sichtkarte“. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird im Folgenden der Begriff Viewshed verwendet, wenn nur die Verteilung der sichtbaren Gebiete gemeint ist. Von einer Sichtkarte bzw. Sichtbarkeitskarte spricht man, wenn die Viewshed Darstellung zusammen mit Kartenelementen zur besseren Visualisierung dargestellt wird.

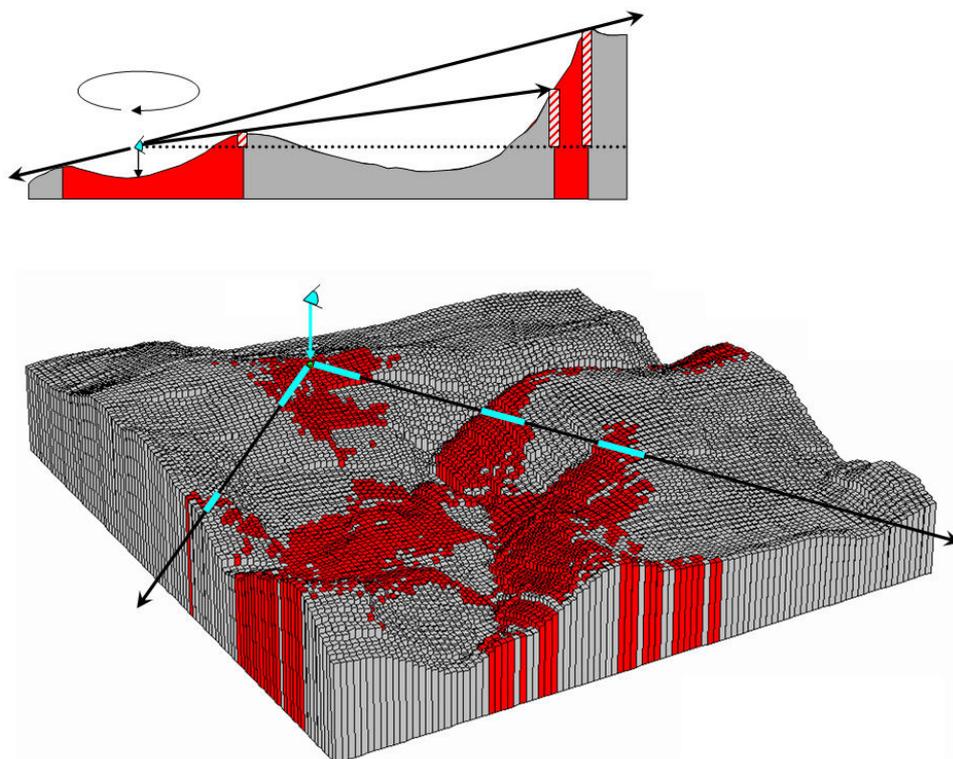


Abbildung 3-4 Viewshed Analyse mit sichtbaren Bereichen in Rot
(Quelle: www.innovativegis.com)

Bei der Berechnung von Viewshed-Karten (z.B. für die Planung von Windkraftanlagen) wird meist nicht nur ein einzelner Betrachterpunkt (Observer) untersucht, sondern eine Mehrzahl von Beobachterpunkten (geplante Masten). Für das Endergebnis werden dann die einzelnen Viewsheds zu einer Karte zusammengefasst bzw. überlagert. Je nach verwendeter Software, kann dann die Anzahl der vom Geländepunkt aus sichtbaren Beobachterpunkte als Attribut gespeichert, oder auch die genaue ID der sichtbaren Beobachterpunkte attribuiert werden.

3.2.1.2 Stand der Forschung

Als Basis für die Viewshed Analyse dient eine Sehstrahl-Analyse für jeden Observer Standpunkt zu den umliegenden Geländepunkten. Der Rechenaufwand/-zeit ist abhängig von der Auflösung des Geländemodells und der Anzahl der Observerpunkte. Je kleiner die Rasterweite eines DTM's ist, desto mehr Höhenpunkte müssen bei der LOS-Analyse untersucht werden. Eine Möglichkeit, die Rechenzeit zu reduzieren ist die Entwicklung effizienterer Algorithmen. Hier haben Fischer (1993, 1996), Wang et al. (1996) und De Floriani et al. (1994, 1998, 2003) verschiedene neue Algorithmen vorgestellt. Einen recht schnellen Algorithmus entwickeln Franklin und Ray (1994). Der Zuwachs an Recheneffizienz wird aber erkauft durch einen weniger genauen Approximationsalgorithmus. In einer weiteren Arbeit geht Wang einen neuen Weg (Wang et al., 2000) und untersucht nicht, ob die Line of Sight durch einen Schnittpunkt (intermediate point) unterbrochen wird, sondern führt Referenzebenen durch benachbarte Rasterpunkte in die Analyse ein. Neue Entwicklungen basierend auf verbesserten LOS Algorithmen findet man auch bei Liu et al.(2010), während Rana (2003) und Young et al. (2004) extrahierte Geländeobjekte (terrain features) einsetzen und damit die Anzahl der zur untersuchenden Zielpunkte auf fundamentale topographische Gebiete wie Anhöhen, Pässe, Grate, Täler,... reduzieren.

Die rasante Entwicklung in der Computertechnik ermöglicht neben der mathematischen Optimierung der Berechnungsverfahren auch eine deutliche Verbesserung der Rechenzeiten durch neue Hardware. Besonders die Fortschritte im Bereich der Mehrkernprozessoren bzw. Parallelprozessierung, schnellere Speichermedien und Arbeitsspeicher (SSDs und RAM) und verbesserte Datentransferraten haben die effizientere Anwendung der schon vorhandenen „klassischen“ Algorithmen ermöglicht.

Die Weiterentwicklung und neue Ansätze bringen aber eine weitere Leistungssteigerung in Bezug auf Rechenzeiten und die Größe der verwendeten DTMs.

Magalhães et al. (2010) hat für die Fragestellung des „Multi-Observer sitings“, d.h. der Ermittlung der Minimalverteilung von Beobachtungspunkten um ein bestimmtes Gebiet komplett einzusehen (z.B. Planung von Mobilfunkmasten), eine Verfahren namens EMSite (External Memory Site) entwickelt. Neben dem Optimierungsalgorithmus teilt EMSite das DTM auch in kleine Subblöcke auf, welche im internen Arbeitsspeicher schnell analysiert werden. Zusätzlich werden über das Gebiet hinausreichende Sichtli-

nien in angrenzenden Nachbarblöcken berücksichtigt, welche in einem externen Speicher vorgehalten werden.

Kurz erwähnt seien hier noch die Arbeiten von Zia et al. (2010), Gao et al. (2011) und Yalçın et al. (2011), die mittels Parallelprocessing auf Grafikprozessoren (GPU) deutliche Schnelligkeitssteigerungen bei der Viewshed Berechnung erzielen konnten. Als Programmierschnittstelle diente die von der Firma Nvidia entwickelte CUDA Technik.

3.2.2 Entwurf Analysemethode

Die Technik des Mind Mapping („Gedankenkarte“), vom britischen Psychologen Tony Buzan (2006) entwickelt, bietet eine gute Möglichkeit, Gedanken und Assoziationen zu einem Themenfeld visuell darzustellen. Um ein zentrales Thema oder eine Fragestellung werden Schlüsselbegriffe und Hauptthemen mit gebogenen Linien in Form eines Baumdiagramms angeordnet. An diese Knotenpunkte schließen Unterkapitel bzw. weitere Gedankenebenen mit dünneren Zweiglinien an und verästeln sich ggf. weiter. Dabei können Zweige der gleichen Hierarchiestufe gleichfarbig gestaltet sein, oder bestimmte Farben auch zur Hervorhebung gleicher Themengebiete genutzt werden. Um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Knotenpunkten darzustellen, können Verbindungslinien genutzt werden. Die Mind Map eignet sich sehr gut als Ideensammlung und „Brain-storming“ Instrument und kann ständig ergänzt oder verändert werden. Als Kommunikationsmittel für andere Leser ist sie aber nur bedingt geeignet, da die individuelle Wahl der Ausgestaltung (Farben, Hervorhebungen), Schlüsselwörter und die Art der hierarchischen Gliederung ohne weitergehende Erläuterung durch den Autor nur eingeschränkt nachvollziehbar ist.

Der Ausschnitt der Mind Map in Abbildung 3-5 gibt einerseits einen groben Überblick über das Themenfeld dieser Arbeit, zählt die benötigten Eingangsdaten auf, beinhaltet erste Ideen zur Sichtbarkeitsanalyse und Software und stellt Beziehungen zwischen den Knotenpunkten dar. Die vollständige Mind Map ist im Anhang an diese Arbeit zu finden.

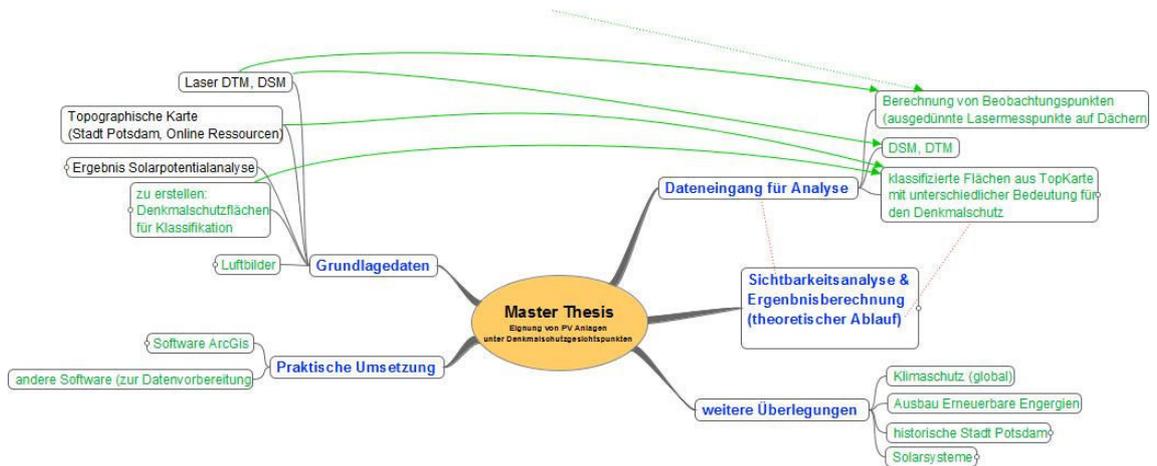


Abbildung 3-5 verkleinerte Version der Mind Map dieser MT

Im nächsten Arbeitsschritt wurde mit Hilfe der Mind Map ein vereinfachter Ablaufplan für die GIS Analyse erstellt (Abbildung 3-6):

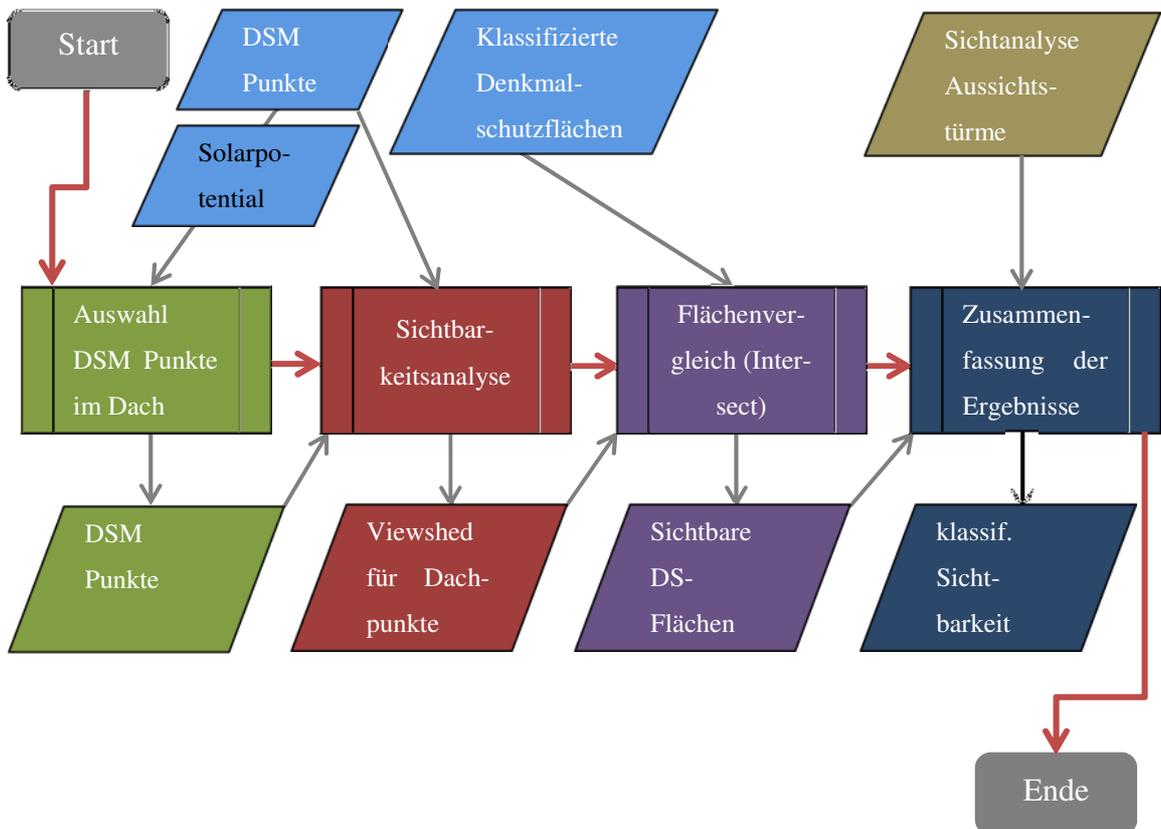


Abbildung 3-6 vereinfachter Ablaufplan der Analysemethode

Die Analyse soll in 4 Teilschritten ablaufen, die nachfolgend näher erläutert werden. Als Ergebnis soll eine Aussage über die Eignung einer Dachfläche für die Solarnutzung unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes getroffen werden. Dafür ist es nötig, eine Bewertung der Sichtbeziehungen im Sinne des Denkmalschutzes durchzuführen. Es ist dabei aber nicht ausreichend, nur zu prüfen, ob eine direkte Sichtverbindung zu denk-

malgeschützten Flächen besteht, da theoretisch fast das gesamte Untersuchungsgebiet in diese Kategorie fällt.

Vielmehr ist eine Kategorisierung der Viewshed Flächen mittels einer Einteilung in unterschiedlich bedeutsame Klassen sinnvoll.

So ist z.B. ein Dach, welches ausschließlich von einem Gewerbe- oder Industriegebiet aus sichtbar ist, unbedeutend für den Denkmalschutz. Niemand wird sich in einer solchen Umgebung durch eventuelle Reflektionen oder direkte Sicht auf eine Photovoltaikanlage gestört fühlen. Das subjektive Erscheinungsbild würde nicht empfindlich negativ beeinflusst werden. Anders wäre die Wahrnehmung, wenn bei einem Spaziergang durch den Park Sanssouci der Blick ungehindert auf ein modernes, glänzendes PV Modul fallen würde.

Es soll daher eine Einteilung in verschiedene Klassen, gestaffelt nach der Bedeutung für den Denkmalschutz (von unwichtig bis sehr wichtig), vorgenommen werden.

Durch eine Verschneidung der Ergebnisflächen der Viewshed Analyse mit den klassifizierten topographischen Flächen kann dann eine Attributierung der Ergebnisflächen mit einer Denkmalschutzkategorie erfolgen. Im Zuge der Bearbeitung wurde von der Denkmalschutzbehörde in Potsdam auch der Wunsch nach einer Einbeziehung von Aussichtstürmen und historischen Sichtachsen in die Analyse geäußert. Daher werden zusätzliche Sichtbarkeitsberechnungen für ausgewählte Aussichtspunkte durchgeführt und für jede Dachfläche im Untersuchungsgebiet eine bestehende Sichtbeziehung in der Attributtabelle vermerkt.

Eingangsdaten

Folgende Basisdaten werden für die Analyse benötigt:

- das digitale Oberflächen- und Geländemodell
- die Ergebnisse der Solarpotenzialanalyse
- die klassifizierten Denkmalschutzflächen (ALK Daten mit Attributierung)

Das DSM wird für die Viewshed Analyse benötigt, das DTM fließt in einen nachfolgenden Berechnungsprozess ein, in dem sichtbare Flächen, die höher als auf Fußgäterniveau liegen aus dem Analysprozess ausgeschlossen werden. Aus den Daten der Solarpotenzialanalyse werden die zu untersuchenden Dachflächen extrahiert. Die unter

Denkmalschutzgesichtspunkten klassifizierten Flächen der topographischen Karte basieren auf den ALK Daten der Stadt Potsdam.

Benutzereingabe und Auswahl der DSM Punkte im Dach

Im ersten Arbeitsschritt soll der Nutzer die Möglichkeit erhalten, bestimmte Dachflächen aus der Solarpotenzialanalyse für die weitere Untersuchung interaktiv auszuwählen. Ist dies erfolgt, werden automatisch die Viewshed-Beobachterpunkte für jedes Dach aus dem Oberflächenmodell abgegriffen („Auswahl der DSM Punkte im Dach“).

Sichtbarkeitsanalyse

Für die ausgewählten Beobachterpunkte wird dann eine Sichtbarkeitsanalyse auf Basis des DSM durchgeführt. Einige Parameter wie z.B. die maximale Sichtweite soll der Nutzer selbst bestimmen können. Diese beeinflussen z.T. maßgeblich die Rechenzeit der Analyse. Das Ergebnis der Viewshed Analyse ist ein Raster, welches für jeden sichtbaren Rasterpunkt auch die Anzahl der von dort sichtbaren Dachpunkte enthält.

Flächenvergleich mit den Denkmalflächen

Nach Umwandlung des Viewshed Rasters in Vektordaten (Shapes) können diese durch eine räumliche Abfrage (spatial intersect) mit den klassifizierten Denkmalschutzflächen verschnitten werden. Die sichtbaren Flächen erhalten dann zusätzlich ein Attribut über die Denkmalschutzklassifizierung. Die Ergebnisdaten sollen eine Aussage erlauben, ob und wieviel Prozent der Dachfläche von bestimmten Denkmalschutzflächen aus sichtbar sind.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Hier werden die Analyseergebnisse für jede Dachfläche zusammengefasst, d.h. es soll ein Shape File mit denen vom Dach aus sichtbaren Flächen und deren Denkmalschutzklassifizierung erstellt werden. Es wird auch ein Attribut für die Sichtbeziehungen zu Aussichtstürmen angelegt.

3.3 Umsetzung und Berechnungsprozess

Dieses Kapitel erläutert zuerst die Klassifizierung der Denkmalschutzdaten und beschreibt dann den Entwurf des Analysewerkzeuges im Model Builder von ArcGIS. Anschließend wird auf die Erstellung des Python Modells eingegangen.

3.3.1 Klassifizierung nach Denkmalschutzkriterien

Die vorliegenden topographischen Karten der ALK besitzen einen unterschiedlichen räumlichen Detailierungsgrad und verschiedene Attributierungen. Sie können daher nicht einfach zusammengefasst werden. Einerseits sind die Flächenabgrenzungen völlig unterschiedlich und teilweise auch nicht flächendeckend, andererseits liegen unterschiedliche Bezeichnungen bei den beschreibenden Attributen vor. Der einzige flächendeckende Datensatz mit einem sehr hohen räumlichen Detailierungsgrad ist der Layer „Tatsaechliche_Nutzung_05“ (im Folgenden mit „TN_05“ abgekürzt). Dieser enthält die einzelnen Flurstücksgrenzen und beschreibt mit dem Attribut OSBEZ (Objektschlüsselbezeichnung) die Nutzungsart der Fläche. Leider sind in dieser Datei denkmalgeschützte Gebäude nicht extra in der Attributtabelle ausgewiesen bzw. die Attributierung weist teilweise eine für die Klassifizierung irreführenden Bezeichnung wie Gewerbe- und Industriegebäude aus. Als Beispiel sei hier das Neue Palais im Park Sanssouci genannt, die Datei „TN_05“ führt diese Fläche im Objektschlüssel mit der Nutzungsart „Gebauede- und Freifläche – Gewerbe und Industrie“. Das macht höchstens Sinn, wenn man an die touristische Nutzung denkt, erlaubt aber keine Aussage über den Denkmalschutz. Im Layer „Gebauede_05“ ist für das Palais allerdings „Schloss, Burg“ eingetragen, so dass diese Fläche bei der Klassifizierung für den Denkmalschutz eine angemessene Rolle spielen würde.

Aus diesem Grund wurden alle nützlichen Dateien (siehe Tabelle 2-3) für die Klassifizierung herangezogen und eine vierstufige Klassifizierung mit ansteigender Bedeutung für den Denkmalschutz eingeführt (Tabelle 3-1):

Kategorie	Bedeutung für Denkmalschutz (Attribut: Klassifizierung_DS)
1	unwichtig
2	weniger wichtig
3	wichtig
4	sehr wichtig (Baudenkmäler)

Tabelle 3-1

Die Datenbearbeitung erfolgte mit ArcGIS, die Dateien wurden als Feature Class in einer gemeinsamen File-Geodatabase (GDB) verwaltet.

In jedem dieser Datensätze wurde ein zusätzliches Attribut „Bedeutung_DS“ angelegt und alle Flächen zunächst basierend auf ihren schon vorhandenen Attributen in eine Klasse von 1 bis 3 eingestuft. Die Kriterien für die Klassenzuweisung liegen dabei nicht ausschließlich beim Denkmalschutz, sondern orientieren sich auch am kulturellen, touristischen oder Freizeit-Wert der Fläche. Die Klasse 4 ist den Flächen mit Denkmalschutzstatus aus der Datei „Baudenkmale_Stand20100326“ vorbehalten.

In Tabelle 3-2 sind die Kriterien für die einzelnen Dateien für die Stufen 2 und 3 aufgelistet, alle anderen Flächen erhielten den Wert „1“.

Kategorie 3 – wichtig	Kategorie 2 – weniger wichtig
Datei: Gebaeude_05 Attribut: OSBEZ	
<ul style="list-style-type: none"> • Schloss, Burg • Aussichtsturm • Windmuehle • Theater, Oper • Empfangsgebäude des botanischen Gartens • Empfangsgebäude des Zoos 	<ul style="list-style-type: none"> • Trauerhalle • Museum • Jugendfreizeitheim • Jugendherberge • Freizeit- und Vergnuegungsstaette • Pflanzenschauhaus • Freizeitheim, Dorfgemeinschaftshaus, Bu- ergerhaus • Friedhofsgebäude • Gebaeude fuer Erholungszwecke ("- son- stige) • Gebaeude fuer kulturelle Zwecke (sonstige) • Gebaeude im botanischen Garten (allge- mein) • Gebaeude im Zoo (sonstige) • Gebaeude zur Freizeitgestaltung • Konzertgebäude (-halle) • Seniorenfreizeitstaette • Seniorenwohnhaus, Seniorenheim • Stall im Zoo
Datei: NichtKatasterGebaeude_05 Attribut: OSBEZ	
<ul style="list-style-type: none"> • Schloss, Burg 	<ul style="list-style-type: none"> • Freizeitheim, Dorfgemeinschaftshaus, Bu- ergerhaus • Bibliothek, Buecherei • Gebaeude fuer Erholungszwecke • Gebaeude fuer Erholungszwecke (sonstige) • Gebaeude fuer kulturelle Zwecke (sonsti- ges) • Gebaeude zur Freizeitgestaltung (sonstiges) • Veranstaltungsgebäude
Datei: Bauwerke_05 Attribut: OSBEZ	
<ul style="list-style-type: none"> • Schloss-, Burgturm 	

<ul style="list-style-type: none"> • Aussichtsturm • Stadt- und Torturm • Wachturm 	
Datei: WeitereTopografie_05 Attribut: OSBEZ	
<ul style="list-style-type: none"> • Historische Anlage • Parkanlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Marktplatz • Platz • Gruenanlage (allgemein) • Gruenanlage (sonstige) • Bad, allgemein • Bad im Fluss oder See (Standbad)
Datei: TatsaechlicheNutzung_05 Attribut: OSBEZ	
<ul style="list-style-type: none"> • Denkmal • Andere historische Anlage • Historische Anlage • Historischer Friedhof 	<ul style="list-style-type: none"> • Andere Erholungseinrichtung • Anlegestelle • Bad • Botanik • Erholungsfläche • Freibad • Freizeitanlage, (Gruenanlage) • Gebaeude- und Freiflaeche - Erholung (allgemein)

Tabelle 3-2

In den 5 unterschiedlichen ALK Dateien liegen nach dieser Klassifizierung für jede Fläche teils redundante, teils widersprüchliche Bewertungsattribute vor. Wie schon am Beispiel vom Neuen Palais erwähnt, kann es vorkommen, dass eine Fläche sowohl der Kategorie 3 als auch der Kategorie 1 zugeordnet wird. Um einen eindeutigen und korrekten Datensatz zu erhalten, wird eine räumliche Abfrage mit Tabellenjoin für alle Dateien durchgeführt und in „TN_05“ gespeichert. Die Attributtabelle wird so durch die Angaben der anderen Dateien ergänzt. Es werden jeweils die maximalen und minimalen Werte für das Attribut „Bedeutung_DS“ in eine neue Tabellenspalte „Klassifizierung_DS“ übertragen. Für eine eindeutige Klassifizierung wird dann nur der jeweils größte bzw. bedeutsamste Wert pro Fläche ermittelt und weiterverwendet.

Die Kategorie „4“ („sehr wichtig“) ist den Baudenkmalern vorenthalten. Über eine Spatial Join Operation wird im letzten Klassifizierungsschritt allen Flächen, die Baudenkmalern beinhalten, der Wert „4“ zugeordnet. Diese Operation ist eine der wichtigsten Funktionen im Geodatenbank-Management. Sie verknüpft diejenigen Objekte zweier Dateien miteinander, die eine geometrische Bedingung erfüllen. Im vorliegenden Fall wurde der „Intersect“ Join verwendet, d.h. den Objekten der Datei „TN_05“ werden die Tabellenattribute der Objekte von „Baudenkmaeler zugeordnet, die sie räumlich schnei-

den. Erhält eine Fläche durch die Spatial Join Operation eine Zuordnung zu einem Baudenkmal, so wird die Denkmalschutzklassifizierung auf den höchsten Wert „4“ gesetzt. Ansonsten ändert sich die vorherige Klassifizierung nicht. Gespeichert werden die Ergebnisse in der GDB als Feature Class „Klassifizierung_Denkmal_join_Baudenkmal“.

3.3.2 Entwurf des Analyse Scripts

Mit dem Model Builder von ArcGIS bietet ESRI die Möglichkeit, in einer grafisch interaktiven Modellierungsumgebung eigene Workflows zu erstellen. Diese können als eigene Werkzeuge (Tools), Scripte oder Modelle gespeichert oder in andere Modelle eingebunden werden. Über eine grafische Flow-Chart Darstellung können Referenzen auf Datenquellen, Geowerkzeuge und Scripte miteinander zu neuen Prozessketten verknüpft werden. Durch die Ergänzung mit Schleifen und Abbruchkriterien können sehr komplexe Arbeitsabläufe relativ einfach erstellt werden. Der Model Builder verfügt auch über eine Schnittstelle, welche die Modelle z.B. als Python Skript (mit Einschränkungen) exportieren, oder externe Skripte als neue Tools in die Modellumgebung einbinden kann.

Der Model Builder eignet sich auch gut, um Programmabläufe zu entwerfen und anschließend als Python Script weiterzuentwickeln. Der Entwurf für das Analysescript mit dem Model Builder ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Eingangsdaten sind im MB durch blaue und Ausgangsdaten durch eine grüne Ellipse symbolisiert. Ein Geodatenwerkzeuge wird als gelbes Rechteck dargestellt und der Iterator erscheint als oranges Hexagon. Variablen, die von einem Werkzeug während des Berechnungsprozesses erstellt werden, sind als türkise Ellipsen visualisiert. Im Model Builder der ArcGIS Version 10 ist momentan nur ein Iterator pro Modell erlaubt. Iteratoren lassen sich nur innerhalb des MB´s ausführen und werden bei dem Export in eine Python Script nicht unterstützt. Sie müssen daher in Python nachträglich programmiert werden.

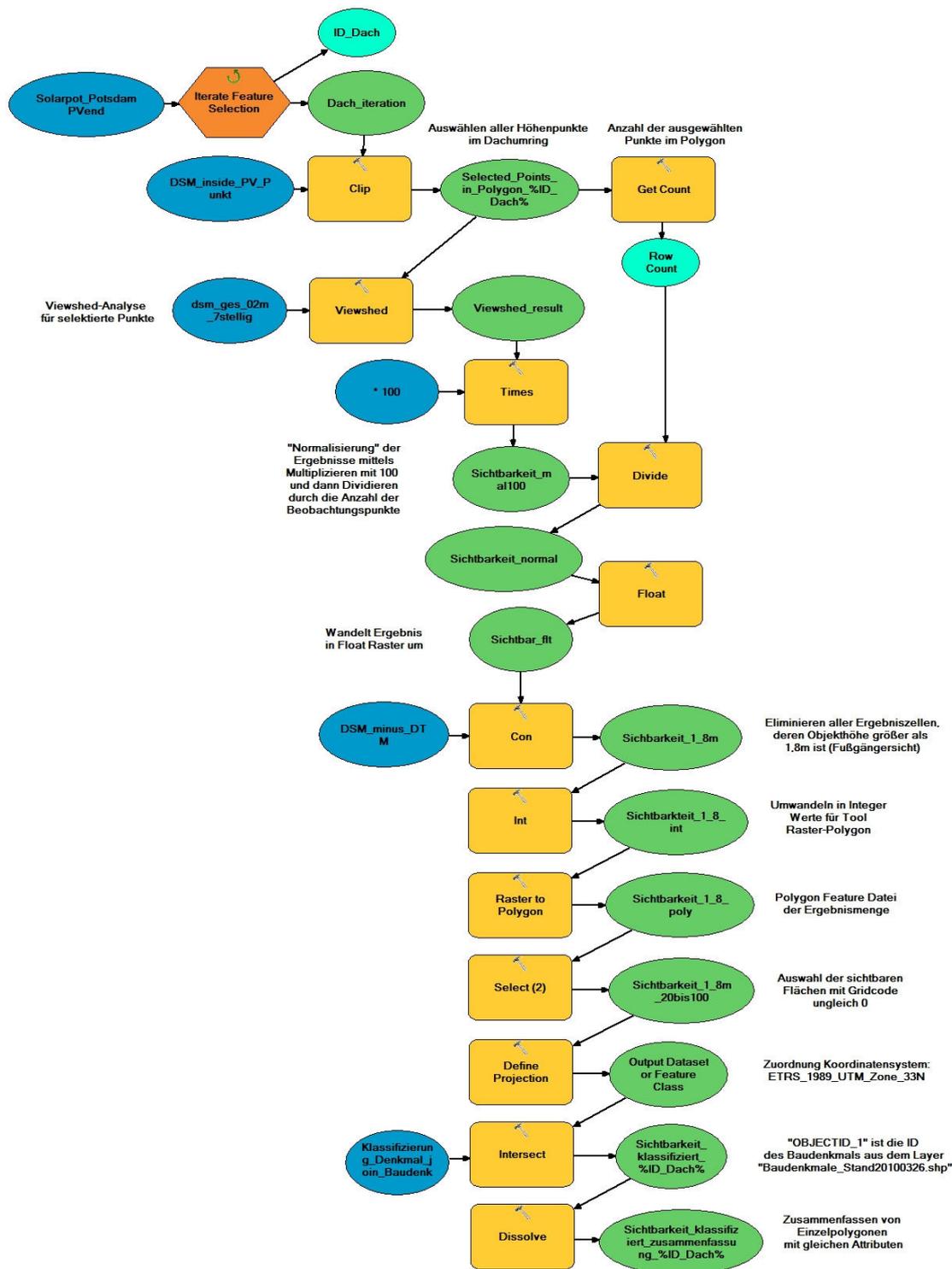


Abbildung 3-7 Entwurf des Analysescripts im Model Builder

Programmablauf

Die Schleife *IterateFeatureSelection* durchläuft eine Auswahl von Eingabe Features (die zu untersuchenden Dachumringe bzw. Solarpotentialflächen) und ruft dabei die Funktion *MakeFeatureLayer* auf. Es wird ein neues Ausgabe Feature (der zu analysie-

rende Dachumring) erstellt und auch ein Wert *ID_Dach* (die ID des Dach-Features) ausgegeben.

Im *Clip* Werkzeug (Ausschneiden) werden für das Ausgabefeature alle DSM Punkte, die innerhalb des Dachumringes liegen ausgewählt und in eine neue Feature Class gespeichert. Dabei wird die Variable *ID_Dach* aus dem Iterator als Namenssuffix verwendet. Das Werkzeug *Get Count* ermittelt die Anzahl der Punkte und speichert sie im Wert *Row Count*.

Die Sichtbarkeitsanalyse wird im Tool *Viewshed* durchgeführt. Als Eingangsdaten dienen die DSM Punkte des Daches (Beobachterpunkte) und das Oberflächenmodell. Das Resultat ist eine Raster Datei (Viewshed Result, Integer Format). Der Wert der Rasterpunkte gibt an, von wie vielen Dachpunkten das Pixel aus sichtbar ist. Über die Werkzeuge *Times* und *Divide* wird eine mathematische Rasterberechnung durchgeführt. Jeder Rasterwert wird mit 100 multipliziert und dann durch die Anzahl der Dachpunkte geteilt (*Row Count*). Somit erhält man eine Prozentangabe für die sichtbaren Dachpunkte. Für die weitere Berechnung wird dieses Raster mit dem Werkzeug *Float* in ein Fließkomma-Raster umgewandelt. Diese Konvertierung ist notwendig, damit das Raster mit dem Höhenraster im nächsten Werkzeug *Conditional* (Con) auf eine Bedingung getestet werden kann. Warum dies notwendig ist, wird durch die nachfolgende Abbildung 3-8 verdeutlicht.

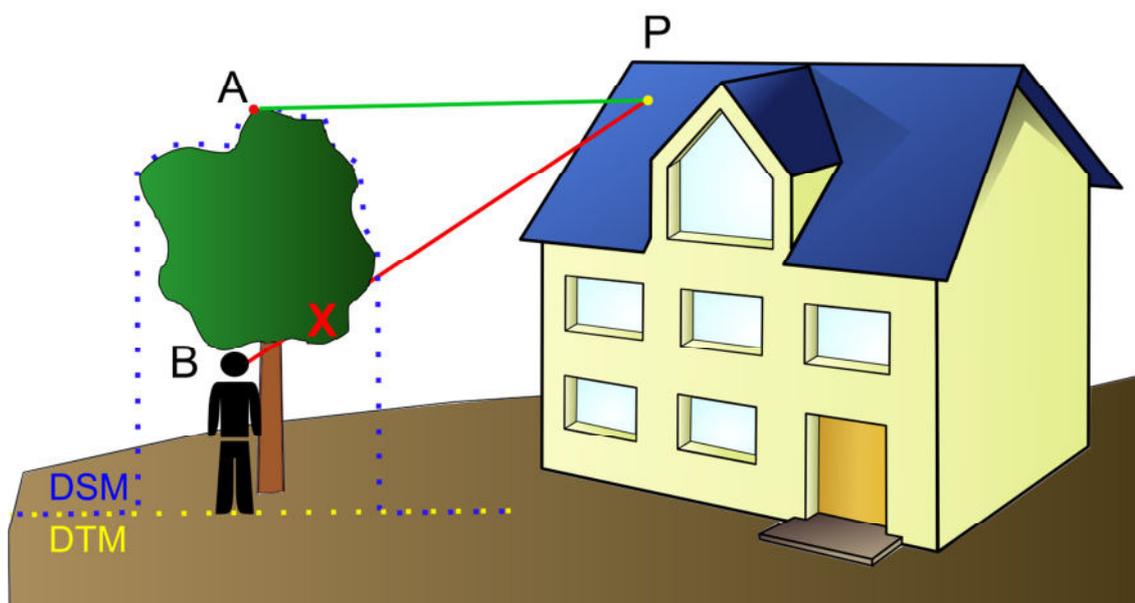


Abbildung 3-8 Einschränkungen bei der Sichtbarkeitsanalyse und Reduzierung der Ergebnismenge auf "Fußgängerniveau" (eigene Darstellung mit Teilquellen)

Im Zuge der Viewshed Analyse wird für jeden Beobachterpunkt P berechnet, welche Rasterzellen des DSM von P aus sichtbar sind. Im Umkehrschluss gilt also auch, dass der Dachpunkt von diesen ermittelten Bereichen aus direkt einsehbar ist. Für die Beurteilung der Tauglichkeit des Daches als PV Standort ist es aber uninteressant, ob das Dach von Baumgipfeln, anderen Dachflächen oder ähnlich hoch aufragenden Objekten des DSM aus sichtbar ist (A). Interessant sind nur die Sichtbeziehungen aus der Perspektive eines Fußgängers (B). Nimmt man die maximale Augenhöhe eines Erwachsenen mit 1,8m an, so sind nur noch die Ergebniszellen der Viewshed Analyse relevant, die eine Höhendifferenz von nicht mehr als 1,8m zwischen Gelände- und Oberflächenmodell aufweisen.

Da die Viewshed Berechnung in ArcGIS auf 2½ D Eingangsdaten beruht (Raster Höhenmodelle mit genau einem Z-Wert pro Koordinate) können nicht alle in der Praxis möglichen Sichtbeziehungen ermittelt werden. Theoretisch könnte z.B. eine Person (B) unter einem großen Baum A (mit $X_A = X_B$, $Y_A = Y_B$, $Z_A > Z_B$) eine direkte Sicht auf Punkt P haben. Umgekehrt könnte allerdings auch der Fall sein, dass B den Dachpunkt P nicht sehen kann, da ein großer Ast oder ein anderes hohes Objekt (niedriger als das DSM an dieser Stelle) genau in Dachrichtung die Aussicht blockiert. Eine interessante Herangehensweise für die Sichtbarkeitsanalyse in 3D Szenen ist bei Liu et. al. (2010) beschrieben. Liu nutzt vereinfachte geometrische Baummodelle welche auch den Abstand zwischen Boden und dem Beginn der Verästelung in der unteren Baumkrone beinhalten. Für seine Methode müssen aber die groben Abmessungen der Bäume bekannt sein und diese in ein 3D Modell überführt werden. Für punktuelle Einzeluntersuchung von bestimmten Sichten ist diese Herangehensweise vertretbar, allerdings wäre sie nur mit sehr hohem Aufwand (detaillierte und realitätsnahe 3D Stadtmodelle inkl. Vegetation) für eine großflächige Untersuchung wie z.B. der Solarpotenzialflächen in Potsdam umsetzbar.

Das Werkzeug *Conditional* prüft für jede Zelle des Differenzrasters aus DSM und DTM (Bedingungs raster, engl. „Input-conditional-raster“) auf eine Bedingung („VALUE“ \leq 1,8; d.h. Höhendifferenz kleiner als 1,8m) und weist dann allen Zellen, die mit „Wahr“ ausgewertet werden einen Wert aus dem „Input-true-raster“ (hier Sichtbarflt) zu. Ist die Bedingung nicht wahr (False), dann kann ein Wert aus einem optionalen „Input-false-raster“ zugewiesen werden, oder eine Konstante als neuer Zellenwert eingetragen werden. Im vorliegenden Fall wird für alle Zellen mit einer Objekthöhe \geq 1,8m der neue Wert „NoData“ eingetragen. Zellen mit einer kleineren Höhendifferenz behalten die

Sichtbarkeitsaussage aus der Viewshed Analyse. Im Beispiel in Abbildung 3-9 sind alle Flächen dargestellt, von denen Teile des Daches aus sichtbar sind. Die Einfärbung gibt den Prozentsatz der einsehbaren Dachfläche an.



Abbildung 3-9 sichtbare Flächen ohne Reduzierung

Nach der Ausführung des Conditional Werkzeuges (siehe Abbildung 3-10) sind alle Ergebnisflächen mit einer Objekthöhe größer als 1,8m entfernt. Es verbleiben nur die aus Fußgängersicht einsehbaren Flächen.



Abbildung 3-10 sichtbare Flächen nach der Reduzierung mit Conditional

Für die Verschneidung mit den klassifizierten Denkmalschutzflächen wird das Ergebnis durch das Werkzeug *RasterToPolygon* wieder in ein Polygon Feature umgewandelt. Der Zwischenschritt *Int* konvertiert zuvor das Fließkomma Raster wieder in ein Ganzzahl-Raster zurück.

Das Polygon Feature enthält immer noch Flächenteile mit dem Sichtbarkeitswert „gridcode“ = 0, d.h. Bereiche von den das Dach aus nicht sichtbar ist. Durch eine *Select* Abfrage werden alle Flächen mit Werten größer Null ausgewählt und in einer neuen Feature Class gespeichert („Sichtbarkeit_1_8m_20bis100“).

Vor der Verschneidung mit den Klassifizierungsflächen wird der Feature Class das richtige Koordinatensystem zugeordnet. Das *DefineProjection* Tool aktualisiert die Information zum Raumbezug und ersetzt sie mit dem System ETRS89 (UTM Zone 33 Nord).

Der vorletzte Schritt ist die Überschneidungsanalyse (*Intersect*) der sichtbaren Flächen und der Denkmalschutz-Klassifizierungsflächen. Dabei werden für die Flächen der beiden Feature Classes die Überlappungsbereiche analysiert und aus diesen neue Teilflächen mit den Attributen beider Eingangsdatensätze gebildet (siehe Abbildung 3-11).

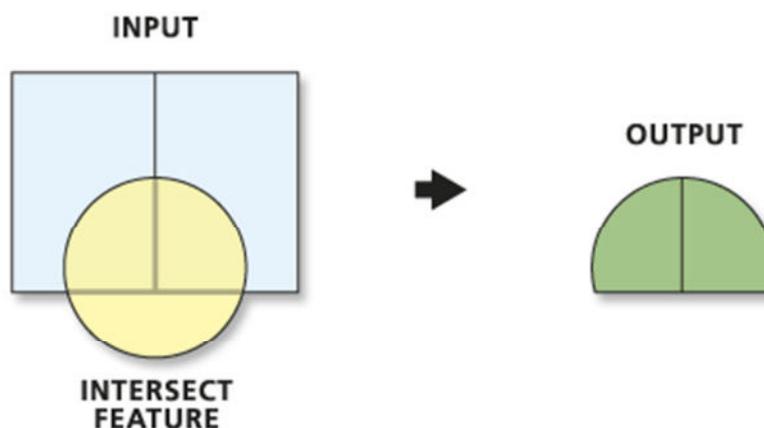


Abbildung 3-11 Funktionsprinzip Intersect Werkzeug
(Quelle: <http://help.arcgis.com>)

Bei der Durchführung des Intersect Werkzeuges entstehen naturgemäß sehr viele kleine Flächenpolygone. Um ein übersichtliches Resultat in Form einer Feature Class zu erhalten kann man Polygone mit gleichen Attributen mit dem Werkzeug *Dissolve* zusammenfügen. Im vorliegenden Fall werden Teilflächen mit denselben Werten in „grid_code“ (Anzahl der sichtbaren Dachpunkte) und „Klassifizierung_DS“ zu einem Feature zusammengefasst. Dabei entsteht ein Multipart Feature, das auch räumlich voneinander getrennte Elemente enthalten kann. In der Attributtabelle wird dieses aber nur

als ein Datensatz angezeigt. Zur Zusammenfassung der Einzelpolygone werden automatisch die Flächensummen gebildet und in einer neuen Attributspalte abgelegt.

3.3.3 Python Script

Das Grundgerüst für das Analysescript bildet der Model Builder Entwurf, der als Python Script exportiert werden kann. Die Open Source Programmiersprache wurde erstmals mit der Version 9.0 in ArcGIS implementiert (ArcPy Site Packet) und hat sich seitdem zur bevorzugten Scriptsprache entwickelt. Die Anzahl der unterstützten Funktionen und Zugriffsmöglichkeiten auf die ESRI Geodatenwerkzeuge hat sich stetig weiterentwickelt.

In diesem Kapitel sollen nur einige Aspekte des entwickelten Python Skripts betrachtet werden. Es dient aber nicht der zeilenweisen Erläuterung des Programmcodes sondern gibt die Implementierung nur anhand von ausgewählten Beispielen wieder. Das vollständige Script kann im Anhang nachgeschlagen werden.

Das Script beinhaltet im Wesentlichen die Werkzeuge aus dem Model Builder und wurde ein einigen Stellen erweitert.

Zu Beginn des Scriptablaufes ist eine Schleife eingebaut, welche zunächst die Beobachterpunkte einer zu analysierenden Dachfläche aus dem DSM Raster mit der 2m Auflösung abgreift. Liegen weniger als 4 Punkte innerhalb des Umrings, soll die Auswahl der Beobachterpunkte aus dem 0,5m Raster erfolgen. Da die Viewshed Analyse sehr rechenintensiv ist, wird zunächst versucht, mit einer geringeren Punktdichte eine Analyse durchzuführen. Bei 1 oder 2 Beobachterpunkten ist die Analyse nicht sehr aussagefähig, also werden bei kleineren oder sehr schmalen Flächen DSM Punkte aus dem höherauflösenden Raster verwendet. Liegt gar kein Punkt innerhalb der ausgewählten Dachfläche, wird eine Fehlermeldung an den Nutzer zurückgegeben, mit der Bitte, alle Eingangsdaten zu prüfen.

Weiterhin werden nach erfolgter Analyse alle temporären Daten gelöscht.

Allgemeines zu ArcPy

ArcPy lässt sich in folgende Gebiete unterteilen:

Werkzeuge

- vielfältige Tools aus den Toolboxes von ArcGIS die in ArcPy als Funktionen integriert sind
- geben immer ein Ergebnisobjekt zurück

Umgebungseinstellungen

- sind zusätzliche Steuergrößen oder Parameter für die Geodatenverarbeitung
- werden unabhängig von Werkzeugparametern über die Environment-Klasse (env) angesprochen
- z.B: Festlegen des Koordinatensystems der Ausgabe, Festlegen von Rasterzellengrößen

Funktionen

- in ArcGIS nicht vorhanden, nur zusätzlich zu den Werkzeugen in Python integriert
- ähnlich wie Werkzeuge, geben aber nicht immer ein Ergebnisobjekt zurück
- Beispiele für Funktionen : Abfragen von Datasets und Eigenschaften, Erstellen von Listen, Ausgabe von Warnungen, etc.

Klassen

- stellen eine Art abstrakten Bauplan zur Verfügung und beinhalten Methoden und Attribute
- untersützt wie in anderen Programmiersprachen auch die Instanzierung und Vererbung
- Verwendung:
 - beim Anlegen von neuen Geometrieobjekten
 - bei der Definition von Koordinatensystemen für Feature Classes

Module

- bieten zusätzliche Bearbeitungsmöglichkeiten in ArcGIS
- momentan werden folgende Module unterstützt:
 - Kartenerstellungsmodul „arcpy.mapping“
 - Spatial-Analyst-Modul „arcpy.sa“
 - Geostatistical-Analyst-Modul „arcpy.ga“, mit vielen Werkzeugen zur Kartengestaltung

ArcPy Arbeitsumgebung und Lizenzen

Um Zugriff auf alle ArcGIS Standardwerkzeuge zu erlangen, muss zunächst ArcPy geladen werden. Anschließend wird das Python sys-Modul geladen.

```
import arcpy
import sys
from arcpy import env

env.overwriteOutput = True
```

Das sys-Modul ist eine Standardbibliothek von Python und enthält systemspezifische Funktionalitäten. Es wird nur die sys.exit Funktion benötigt, mit dem das Skript in bestimmten gewünschten Fällen beendet werden kann.

Um das überschreiben von temporären oder immer wieder neu berechneten Daten zu ermöglichen wird in der Projektumgebung (env-Modul) der Parameter für ein Überschreiben von Daten auf den Wert wahr gesetzt. Weiterhin werden die für die Analyse benötigten Lizenzen für den 3D Analyst und den Spatial Analyst angefordert.

Parameter

Der Nutzer soll in der Lage sein, die wichtigsten Parameter für die Berechnung bei der Ausführung des Scriptes selbst zu bestimmen. Es werden daher einige Eingaben als Parameter an das Script übergeben. Am Anfang des Scriptes sind sie in übersichtlicher Kommentarform aufgeführt, so dass jeder Nutzer in der Lage ist, das Script als Tool in ArcGIS anzulegen und auszuführen:

```
## Parameters:
## 0 (input) - Input Features (Feature Layer)
## 1 (input) - Input Features_05 (Feature Layer)
## 2 (input) - Selecting Features (Feature Layer)
## 3 (input) - Selecting Features Field (Field, obtained from
Selecting Features)
## 4 (input) - Output Workspace (Scratch-Workspace)
## 5 (output, derived) - Output Feature Class(es) (Feature
Class, multivalue)
## 6 (input) - radius2 Double input value
```

Das Einlesen der Benutzerparameter geschieht mit der Funktion:

```
arcpy.GetParameterAsText()
```

Bei mehreren Parametern muss unbedingt auf die Reihenfolge der Parametereingabe geachtet werden. Sie muss auf jeden Fall mit der Reihenfolge im Script übereinstimmen.

Einige andere Parameter wie Dateipfade wurden nur als globale Variablen direkt im Script eingegeben. Sie müssen normalerweise nicht geändert werden und würden die Eingabemaske in ArcGIS nur unnötig komplizieren.

Textausgaben (Messages)

Durch die Funktion AddMessage von ArcPy können während der Bearbeitung Informationstexte für den Benutzer ausgegeben werden. Dies ist nützlich, um den aktuellen Bearbeitungsschritt oder auch Fehlermeldungen anzuzeigen. Hier ein Beispiel welches den Anwender über den aktuellen Workspace informiert:

```
arcpy.AddMessage("Current workspace: %s" % outputWorkspace)
```

Datenzugriff mit Cursor

Mit einem Cursor können Zeilen oder Spalten eines Datenobjektes durchlaufen werden. Es gibt drei Arten von Cursor, einen Such-, Einfüge- und Aktualisierungscursor. Alle Cursorarten können nur in Vorwärtsrichtung durchlaufen werden. Oft werden Cursorzugriffe mit den Funktionen „getValue“ und „setValue“ kombiniert, um gezielt auf einzelne Feldwerte einer Zeile zugreifen zu können. Hier ein Beispiel aus dem Script:

```
outputFCs = []
    rows = arcpy.SearchCursor(selectingLayer)
    for row in rows:
        arcpy.management.SelectLayerByLocation(inputLayer,
            "HAVE_THEIR_CENTER_IN", row.getValue(selectingLayerShapeF
            ieldName), "", "NEW_SELECTION")
    ...
```

Zunächst wird eine leere Liste „outputFCs“ angelegt und dann der Suchcursor angelegt. Er durchsucht alle features in „selectingLayers“ (hier die Dachumringe aus der Solarpotenzialanalyse). In der folgenden Schleife wird dann für jede Zeile, d.h. jedes Dachshape eine räumliche „Select“ Funktion ausgeführt. Diese wählt alle Objekte aus dem „inputLayer“ (hier die DSM Punkte) aus, deren Zentroid innerhalb des Dachumringes liegt.

Anlegen, Speichern und Löschen von Feature Layers

Mit der ArcPy Funktion „MakeFeatureLayer_management“ wird aus einem Eingabe Feature Layer ein neues Feature Layer erstellt. Dieses ist aber nur temporär für die Dauer der Sitzung vorhanden und muss, wenn es erhalten bleiben soll, mit der Funktion „CopyFeatures_management“ extra gespeichert werden. Gelöscht werden Objekte mit der Anweisung „arcpy.Delete_management“.

Ein Beispiel aus dem Script:

```
inputLayer = arcpy.MakeFeatureLayer_management(inputFeatures)
...
Speichername = Objektname + "_result_" + str(radius2)
arcpy.AddMessage("Kopieren der Ergebnisse: %s" % Speichername)
```

```
arcpy.Copy_management(Sichtbarkeit_klassifiziert_Zusammenfassung,  
Speichername)
```

...

```
for FCs in lstFCs:  
    arcpy.AddMessage("lösche Feature Classes: %" % FCs)  
    arcpy.Delete_management(FCs)
```

Ausführen von Werkzeugen

Durch das ArcPy Site Packet kann man auf alle Werkzeuge von ArcGIS zugreifen, die sonst auch in ArcMap zur Verfügung stehen. Einige Werkzeuge benötigen spezielle Lizenzstufen, die ggf. vorher angefordert werden müssen. Im Gegensatz zu Funktionen geben Werkzeuge immer ein Ergebnisobjekt zurück. Ein Beispiel für den Aufruf des Viewshed Werkzeuges aus dem 3D-Analyst Modul:

```
arcpy.Viewshed_3d(dsm_ges_02m_7stellig, FC, Viewshed_result,  
"1", "CURVED_EARTH", "")
```

Die Eingangsdaten sind das Höhenmodell und das jeweilige Schleifen-Feature „FC“ (die Beobachterpunkte). Die Ausgangsdaten werden in „Viewshed_result“ gespeichert, der Höhenkoeffizient beträgt 1 und eine Erdkrümmungskorrektur wird angebracht.

Einbindung des Scriptes in ArcMap

Das fertige Script kann wie ein Werkzeug in ArcMap importiert werden. Wichtig dabei ist, dass eine neue Toolbox angelegt werden muss. Bereits vorhandene Toolboxes können nicht erweitert werden. Der Import erfolgt über die Funktion „Add Script“, danach kann der Name und eine kleine Beschreibung eingegeben werden. Nach der Eingabe des Dateipfades für das Python Script, erwartet ein Eingabefenster die Definition der Scriptparameter (siehe Abbildung 3-12). Um die spätere Eingabe beim Start des Tools für den Nutzer zu vereinfachen, können die Pfade oder Namen von Eingabefeatures schon als default vordefiniert werden. Sie müssen nur bei Bedarf geändert werden.

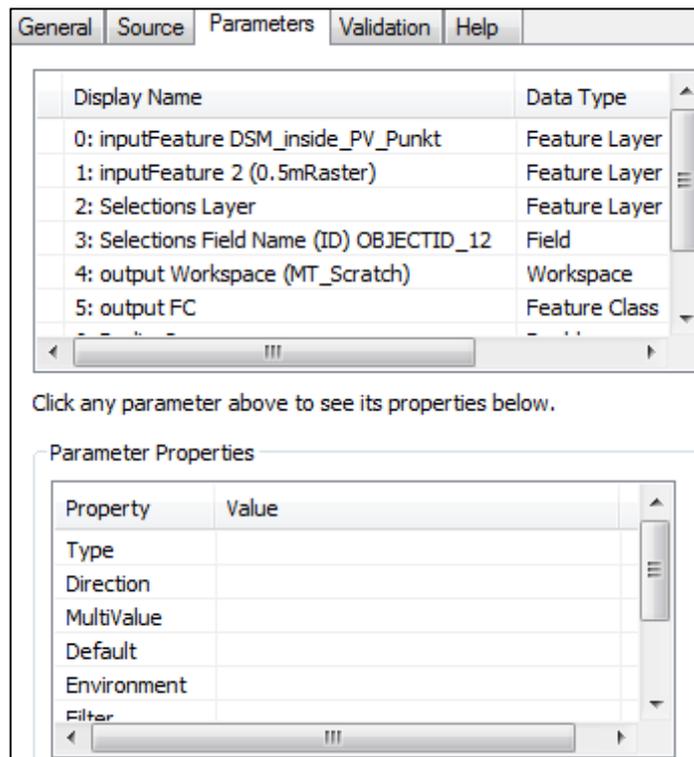


Abbildung 3-12 Scriptparameter in ArcMap

Der eigentliche Aufruf des Analysescriptes erfolgt analog zu den schon vorhandenen ArcGIS Werkzeugen.

Rechenzeiten

Das Script wurde auf einem PC mit Intel i7 Core (Quad Core mit 2,8GHz) mit 8GB RAM durchgeführt. Als Betriebssystem lief Windows 7 (64bit), die ArcGIS Version 10 (SP2) war installiert. Die Daten wurden auf einer internen Festplatte (SATA2) bereitgestellt. Die Berechnungszeit für ein Gebäude betrug im Durchschnitt ca. 17 Minuten. Sie ist stark abhängig von der Anzahl der Beobachterpunkte und dem maximalen Sichtradius. Mit einem kleinen Radius (100m) und geringer Punktzahl wurden Werte von ca. 9 Minuten erzielt, bei einem Radius von 2000m und ca. 15 Punkten betrug sie ca. 25 Minuten. Bei einem Radius von 3500m tendiert die Berechnungszeit zu 30-35 Minuten pro Objekt. Die Analysen wurden auf einen Radius von 2000m beschränkt, könnten aber durchaus noch kleiner gewählt werden, da der Mensch Objekte in so großer Entfernung nur noch begrenzt wahrnehmen kann.

Leider unterstützt ArcGIS im Moment noch keine Mehrkernprozessierung. Die Berechnung auf einem noch leistungsfähigeren Single-Core Rechner hätte die Rechenzeiten sicherlich noch einmal verkürzen können.

3.3.4 Einbindung der Aussichtstürme

Nach einer ersten Präsentation der Ergebnisse der Analysefunktion im Herbst 2011 bei der Denkmalschutzbehörde wurde deutlich, dass auch die Sichten von öffentlich zugänglichen Aussichtsplattformen eine große Rolle bei der Beurteilung für die Eignung eines Solarstandortes spielen. Eventuelle vorhandene Sichtbeziehungen wurden von den Mitarbeitern der Behörde bisher anhand von analogen oder digitalisierten Sichtachsenkarten abgeschätzt oder durch eine Ortsbegehung erkundet. Um hier eine deutliche Arbeitserleichterung zu schaffen, wurde in einem zusätzlichen Arbeitsschritt eine erweiterte Sichtbarkeitsanalyse von ausgewählten Türmen und Plattformen durchgeführt. Ein Schema des Analyseablaufs ist in Abbildung 3-13 dargestellt. Folgende Gebäude wurden für die Analyse ausgewählt:

Aussichtsturm/ Gebäude	Abkürzung
Communs, Nordturm	CommunsN
Communs, Südturm	Communs_S
Orangerie, Ostbalkon	OrangerieO
Orangerie, Westbalkon	OrangerieW
Orangerie, Aussichtsplattform	OrangerieT
Belvedere auf dem Klausberg	Klausberg
Normannischer Turm unten, Ruinenberg	NormTurmU
Normannischer Turm oben, Ruinenberg	NormTurmO
Historische Mühle von Sanssouci, obere Plattform	HistMuehle
Pomonatempel, Pfingstberg	Pomonatemp
Johanna Just, Oberstufenzentrum, Aussichtsturm	JustSchule
Erlöserkirche, Turm	Erloeserk
Neues Palais, Nordturm	NeuPalaisN
Neues Palais, Südturm	NeuPalaisS
Westturm Belvedere, Pfingstberg	PfingstbWT
Treppen und Gang, Belvedere, Pfingstberg	PfingstbG
Verbindungsgang Türme, Belvedere, Pfingstberg	PfingstbV
Ostturm Belvedere, Pfingstberg	PfingstbOT
Treppen und Gang, Belvedere, Pfingstberg	PfingstbG
Hans Otto Theater, Aussichtsturm	HO_Theater

Altes Rathaus, Turm	AltRathaus
Residenz Heilig Geist Park, Turm	HeiligGPrk
Alexander Newski Gedächtniskirche, Turm	ANewskiKir

Tabelle 3-3

Die Aussichtsplattformen wurden mithilfe von Stereoluftbildern mit 18cm Bodenaufklärung auf Höhe der die Plattform umgebenden Außenmauern (über welche die Beobachter hinwegsehen können) digitalisiert. Anschließend wurden manuell ca. 6 bis 16 Beobachterpunkte gleichmäßig auf den 3D Umringslinien der Plattformen verteilt und als Beobachterpunkte für eine Viewshed Analyse verwendet. Sie sollen einen Rundumblick eines Besuchers simulieren. Aus Performancegründen und programmtechnischen Beschränkungen sind nur 16 Beobachterpunkte pro Viewshed Analyse zugelassen. Für eine Aussage über das Bestehen von möglichen Sichtbeziehungen sollte diese Anzahl an Punkten aber genügen. Für die in Tabelle Tabelle 3-3 aufgezählten 23 Objekte wurde mithilfe der Beobachterpunkte und des DSM jeweils eine Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt.

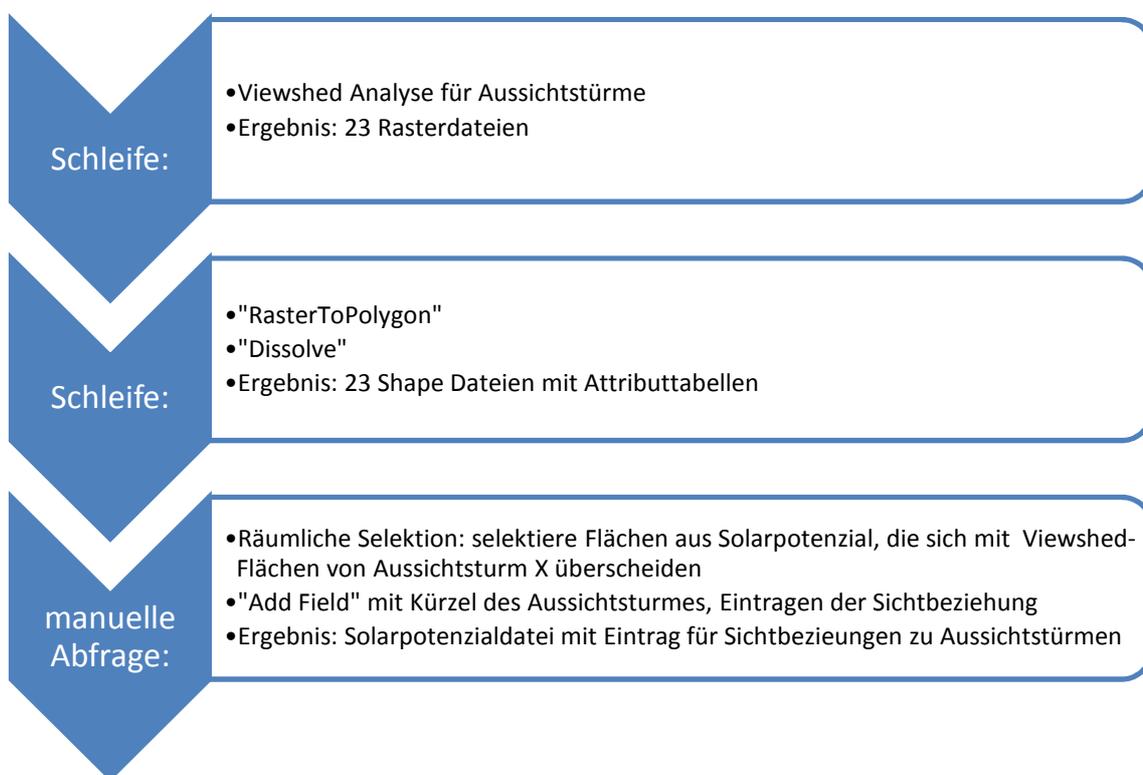


Abbildung 3-13 Ablaufschema der Sichtbarkeitsanalyse der Aussichtstürme

Über eine Schleifenberechnung im Model Builder sind alle Ergebnisraster in Shapefiles umgewandelt und über die Dissolve Funktion jeweils Flächen mit gleichen Attributen zusammengefasst worden. Für jeden Turm liegen als Ergebnis die sichtbaren Flächen mitsamt beschreibender Attributtabelle in einer separaten Datei vor.

Über eine räumliche Selektion (SelectByLocation) können jetzt nacheinander diejenigen Dachflächen ausgewählt werden, die sich mit den Ergebnisflächen eines bestimmten Aussichtsturmes überlagern. Für diese Flächen wird jeweils ein neues Feld mit dem Namens Kürzel des Turmes angelegt und unter diesem Attribut der Wert „sichtbar“ in die Tabellenspalte eingetragen. In einer weiteren Attributspalte wird die Anzahl der insgesamt vom Dach aus sichtbaren Plattformen berechnet und eingetragen.

4. Ergebnisse

Insgesamt wurden in den zwei ausgewählten Testgebieten Bornstedt und Lennéstraße 392 Flächen der Thermalpotenzial- und 547 Flächen der Solarpotenzialanalyse untersucht. Für jedes Objekt wurde ein Ergebnis Feature in einer Geodatenbank angelegt, welches die sichtbaren Flächen und ihre Denkmalschutzklassifizierung enthält. Alle sichtbaren Flächen haben ein Attribut „grid_code“, das auch den prozentualen Anteil der von dort aus sichtbaren Dachfläche (bzw. der analysierten Beobachterpunkte) angibt. Die beiden Eingangsdatensätze der Solar,- bzw. Thermalpotenzialanalyse wurden mit Attributen zur Sichtbarkeit von Aussichtstürmen ergänzt.

4.1 Ergebnisse am Beispiel der Pfarrkirche Bornstedt

Am besten lassen sich die Resultate anhand eines Beispiels vorstellen. Dafür wurde die Pfarrkirche in Bornstedt ausgewählt. Bei dem Gebäude handelt es sich um eine Pfarrkirche in der Ribbeckstraße 40. Die Kirche wurde 1854/55 erbaut und ist ein historisches bedeutendes Baudenkmal. Auf der gegenüberliegenden Straßenseite Richtung Osten schließt sich das Krongut Bornstedt und der Bornstedter See an. Auf dem hinteren Grundstücksteil Richtung Westen befindet sich der historische Friedhof. Einen Überblick über die Lage gibt die Abbildung 4-1.

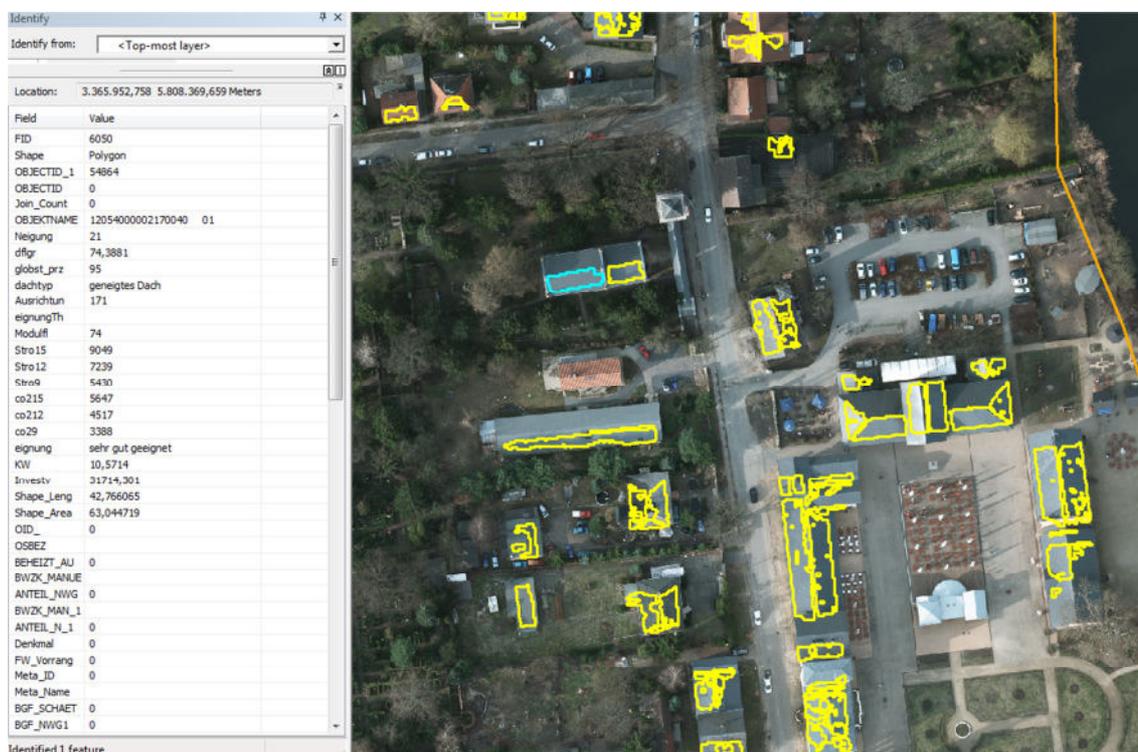


Abbildung 4-1 Pfarrkirche Bornstedt (türkis)

In der Attributtabelle der Solarpotenzialanalyse wird dem um 21 Grad geneigten, nach Süden ausgerichteten Dach eine sehr gute Eignung für die PV Nutzung ausgewiesen. Die klassifizierten Flächen der Karte „Tatsächliche Nutzung“ sind in Abbildung 4-2 halbtransparent hinterlegt. Die roten Flächen sind nach Denkmalschutzkategorie „4“ – sehr wichtig- eingestuft, orange bedeutet „wichtig“ (3), in gelb und grün schließen sich die Kategorien „weniger wichtig“ (2) und „unwichtig (1) an.



Abbildung 4-2 Denkmalschutzkategorien, abgestuft von Rot (4) nach Grün (1)

Die Analyse mit dem Lösungsscript hat für das Dach folgende tabellarischen Ergebnisse berechnet:

FID	Shape *	grid code	Klassifiziert	SUM Shape	Shape Leng	Shape Area
0	Polygon	6	1	395,407227	1450,044055	395,407227
3	Polygon	13	1	262,249398	1088,989355	262,249399
6	Polygon	20	1	278,25	928	278,25
9	Polygon	26	1	220,75	682	220,75
12	Polygon	33	1	84,324501	369,425927	84,324501
15	Polygon	40	1	47,106456	220,41999	47,106456
18	Polygon	46	1	35,734479	178,48223	35,734479
21	Polygon	53	1	36,542361	192,170811	36,542361
24	Polygon	60	1	35,176154	160,057239	35,176154
27	Polygon	66	1	28,484202	171,381955	28,484202
30	Polygon	73	1	17,695075	119,062375	17,695075
33	Polygon	80	1	20,216778	122,942524	20,216778
36	Polygon	86	1	25,634854	126,550385	25,634854
39	Polygon	93	1	26,90358	120,622547	26,90358
41	Polygon	100	1	14	60	14
1	Polygon	6	3	268,877581	1386,523226	268,877581
4	Polygon	13	3	407,282297	1451,134517	407,282297
7	Polygon	20	3	222,804933	1140,592324	222,804933
10	Polygon	26	3	405,249024	1243,852443	405,249024
13	Polygon	33	3	140,324415	752,310417	140,324415
16	Polygon	40	3	108,71059	530,493296	108,71059
19	Polygon	46	3	62,356285	357,352057	62,356285
22	Polygon	53	3	57,907131	324,007221	57,907131
25	Polygon	60	3	24,25	177	24,25
28	Polygon	66	3	27,75	176	27,75
31	Polygon	73	3	654	705	654
34	Polygon	80	3	281,75	300	281,75
37	Polygon	86	3	0,75	5	0,75
2	Polygon	6	4	72,965141	363,47262	72,965141
5	Polygon	13	4	32,218305	171,102165	32,218305
8	Polygon	20	4	14,194786	91,039634	14,194786
11	Polygon	26	4	14,50089	84,040074	14,50089
14	Polygon	33	4	13,601084	87,300139	13,601084
17	Polygon	40	4	16,183321	85,746398	16,183321
20	Polygon	46	4	10,659235	61,645168	10,659235
23	Polygon	53	4	9,550508	46,213002	9,550508
26	Polygon	60	4	4,823846	31,959215	4,823846
29	Polygon	66	4	7,015798	39,393054	7,015798
32	Polygon	73	4	5,304925	31,292852	5,304925
35	Polygon	80	4	4,533222	29,768067	4,533222
38	Polygon	86	4	1,865146	13,471554	1,865146
40	Polygon	93	4	0,59642	6,393907	0,59642

Field	Value
FID	6050
Shape	Polygon
OBJECTID_1	54864
Neigung	21
dfgr	74,3881
globst_prz	95
dachtyp	geneigtes Dach
Ausrichtung	171
eignung	sehr gut geeignet
Denkmal2	Denkmal
Sum_Modulf	121
Communs_N	
Communs_S	
OrangerieO	
OrangerieW	
OrangerieT	sichtbar
Klausberg	
NormTurmO	sichtbar
NormTurmU	sichtbar
HistMuehle	
Pomonatemp	
JustSchule	
NeuPalaisN	
NeuPalaisS	
PfingstbWT	
PfingstbG	
Erlaeserk	
PfingstbV	
PfingstBOT	
HO_Theater	
AltRathaus	
HeiligGrk	
ANewskKir	
SummSicht	3

Abbildung 4-3 Ergebnistabellen, links: Sichtbarkeitsanalyse mit Denkmal-Klassifizierung, rechts: Sichtbarkeit von Aussichtstürmen

Demnach soll die Dachfläche von den Aussichtstürmen der Orangerie (Turm) und der oberen und unteren Aussichtsplattform des Normannischen Turms auf dem Ruinenberg sichtbar sein. Bei einer Besichtigung des Normannischen Turms im Herbst 2011 wurden die Sichtbeziehungen vor Ort visuell geprüft. In der Abbildung 4-4 ist der Blick von der Oberen Aussichtsplattform Richtung Pfarrkirche Bornstedt zu sehen. Sehr deutlich sind der Glockenturm und die beiden Dachflächen der Kirche (Nord- und Südseite) erkennbar. Das Photo wurde stark vergrößert mit einer handelsüblichen Kompaktkamera aufgenommen. Abbildung 4-5 zeigt den Blick in Richtung Orangerie. Die Orangerie selbst ist hinter der Historischen Windmühle und hohen Laubbäumen nicht sichtbar. Man erkennt deutlich die Aussichtsplattform der Mühle. Rechts daneben sind zwei Dachflächen, die zum Nebengebäude der Mühle gehören gut sichtbar.



Abbildung 4-4 Blick Normannischer Turm zu Pfarrkirche Bornstedt



Abbildung 4-5 Blick Norm. Turm Richtung Orangerie



Abbildung 4-6 Blick Norm. Turm Richtung Bornstedt (ohne Zoom)

Abbildung 4-6 wurde ohne Zoom aufgenommen. Man kann im Süden gut die rosa- und beigefarben gestrichenen Gebäude des Krongutes und etwa in der Mitte des Bildes die Pfarrkirche mit Glockenturm erkennen. Die untere Aussichtsplattform des Normannischen Turms ist für Besucher leider nicht mehr zugänglich. Die Dachfläche der Bornstedter Kirche sollten laut Analyse auch von dort sichtbar sein.

Aus den Ergebnistabellen kann man ablesen, dass die Fläche von für den Denkmalschutz sehr wichtigen Arealen einsehbar ist (Klassifizierung_DS = 4) und die Flächengrößen dieser Kategorie von 0,6m² bis hin zu 73m² variieren. Dabei sind von der 73m² Fläche nur ca. 6% der Dachfläche aus sichtbar. Von einem relativ großen Gebiet der Kategorie 3 (407m²) aus sind 13% der Dachfläche sichtbar. Diese Zahlen allein sind für einen Bearbeiter, der entscheiden soll, ob eine mögliche PV Anlage in Konflikt mit den Denkmalschutzbestimmungen steht, nur bedingt aussagekräftig. Zweckmäßiger ist die visuelle Darstellung zusammen mit einem Orthophoto oder einer topographischen Hin-

tergrundkarte. In Abbildung 4-7 ist die Sichtbarkeitssituation in einem solchem Bildschirmausschnitt zu sehen.

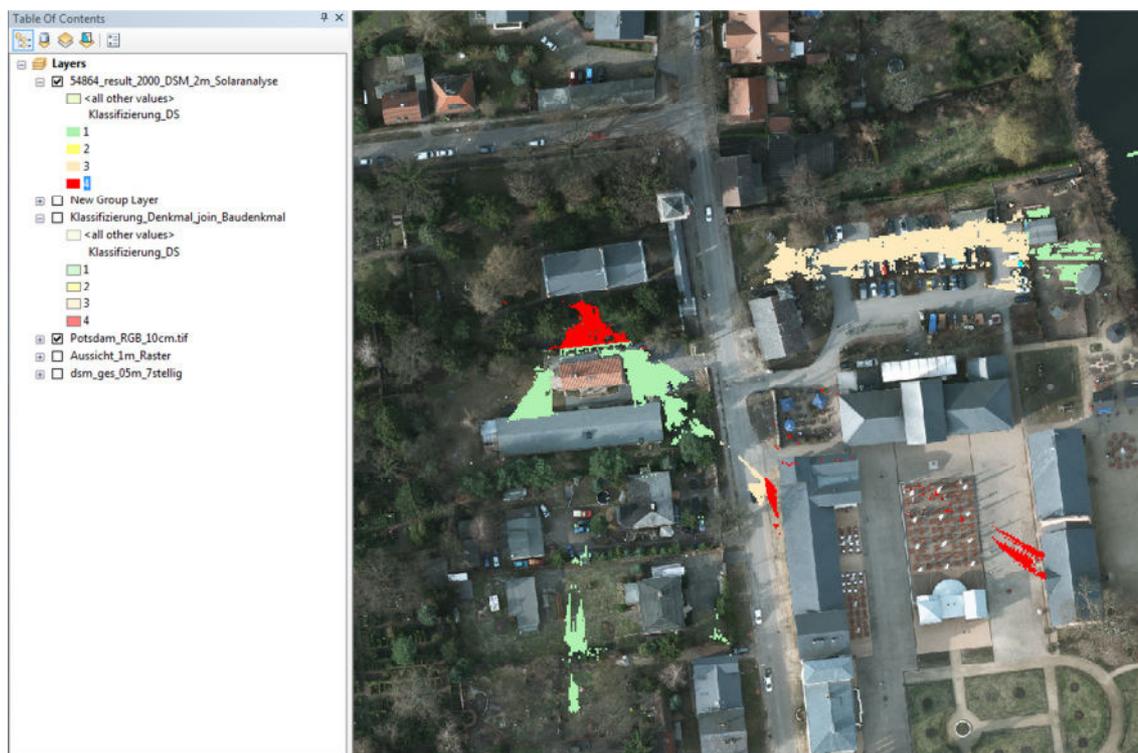


Abbildung 4-7 visuelle Darstellung der klassifizierten Sichtbarkeitsflächen

Diese Art der Darstellung erlaubt eine bessere Einschätzung, ob eine Photovoltaikanlage von denkmalschutzrelevanten Flächen aus sichtbar wäre. Die große Parkplatzfläche der Kategorie 3 im Norden des Krongutes oder die Kategorie 4 Flächen auf dem Fußweg an der Straße, sind sicher nicht ganz so wichtig einzustufen wie die roten (sehr wichtig) Ergebnisflächen direkt im Innenhof des Krongutes. Dieser wird oft für Veranstaltungen genutzt und besitzt daher neben dem historische auch einen hohen kulturellen Wert.

Die tatsächliche Entscheidung für oder gegen eine PV Anlage kann anhand der berechneten Daten nur der Mitarbeiter der Denkmalschutzbehörde treffen. Im Zweifelsfall wird sicherlich auch eine Ortsbegehung nötig sein. Die Analysedaten könnten aber sicherlich dabei helfen, viele „einfache“ Fälle schon vorab im Büro zu beurteilen und nur noch bei besonders kritischen oder heiklen Entscheidungen einen „Feldvergleich“ durchzuführen.

Eine visuell ansprechende Möglichkeit, die Sichtbeziehungen für ein bestimmtes Gebäude darzustellen, ist die Darstellung eines schattierten Höhenmodelles mit der farblich auf die Denkmalschutzkategorie abgestimmten Überlagerung der Ergebnispolygone. In einer Karte kann in einem zweiten Datenfenster zusätzlich ein vergrößerter Aus-

schnitt der direkten Gebäudeumgebung mit einem Orthophoto im Hintergrund und den klassifizierten Sichtflächen abgebildet werden. Eine solche Karte könnte z.B. zu Dokumentationszwecken in der Denkmalschutzbehörde verwendet werden. Ein Beispiel wird im Anhang für die Pfarrkirche in Bornstedt gezeigt. Im Anhang befinden sich zusätzlich Sichtkarten für einige Aussichtstürme, die in Form einer A4 PDF Datei erstellt wurde.

Die Bereitstellung der Daten erfolgt für die Stadtverwaltung Potsdam (Koordinierungsstelle Klimaschutz, Frau Lippert) und die Untere Denkmalschutzbehörde (Frau Dornbusch) in Form einer ESRI Geodatenbank in der Version 9.3. Diese beinhaltet die Ergebnisse für die untersuchten Dachflächen in den Testgebieten. Beide Stellen erhalten ebenfalls die Eingangsdaten der Solarpotenzialanalyse, die um Angaben zu existierenden Sichtbeziehungen zu Aussichtstürmen erweitert wurden.

4.2 Genauigkeitsbetrachtung/ Ergebnisprüfung

„Unlike some other GIS functions the viewshed is not actually verifiable in the field nor can it be logically validated, anything more than trivially, by examination of test figures, as Wagner has done for the overlay algorithm[...]” (Fisher, 1993). In seiner Veröffentlichung beschreibt Fisher, dass die Genauigkeit der Sichtanalysen von mehreren Faktoren abhängig ist. Besonders schwierig bei der Beurteilung der Genauigkeit solcher Analysen ist das Vorhandensein von Vegetation, die nur sehr schwer mit hoher Präzision zu erfassen ist. Auch die komplexen physikalischen Vorgänge der Refraktion und Erdkrümmung haben Einfluss auf die Genauigkeit. Als Hauptfaktoren für die Unsicherheit von Viewshed Analysen nennt er:

- die Art der Ableitung von Höhen aus digitalen Höhenmodellen, je nach Ableitungsmethode werden die Höhen für den Pixelrand linear aus den Höhenwerten der vier umliegenden Pixelmitten interpoliert oder eine Höhe für das gesamte „plane“ Pixel angesetzt
- die Art der Definition der Beobachterpunkte und der Zielfläche (ganze Pixel, Pixelmitten oder Untersuchung der Pixelkanten auf Sichtbarkeit)
- die Art der mathematische Berechnung

Einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben auch die Eingangsdaten. Das 2m Laser DSM und DTM wurde aus Modellen mit 0,5m Rasterweite abgeleitet. Dabei ist eine Interpolation der Höhenwerte durchgeführt worden. Je nach verwendeter Interpolationsmethode (IDW, Spline, Kriging, Nearest Neighbor, usw.) unterscheiden sich die finalen Höhenwerte. Die Höhengenaugigkeit der Original Laserdaten soll zwischen 10 und 15cm liegen.

Einen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse der Viewshed Analyse hat die räumliche Auflösung des DSM. Verallgemeinernd kann man sagen, je höher die Auflösung, desto detaillierter die Ergebniskarte. Wenn das Oberflächenmodell deutlich mehr Details beinhaltet, können Vegetationsflächen und kleinere Objekte wie z.B. Dachaufbauten viel genauer in die Analyse eingehen. Ein relativ kleines Objekt, welches sich nah beim Beobachter befindet, kann große Teile der weiter entfernten Horizontlinie abdecken. Bei einer großen Rasterweite des DSM wird dann die berechnete Horizontabdeckung bzw. der Sichtschattenbereich viel größer erscheinen, als er in Wirklichkeit ist. Dieser Sachverhalt ist stark abstrahiert in Abbildung 4-8 dargestellt.

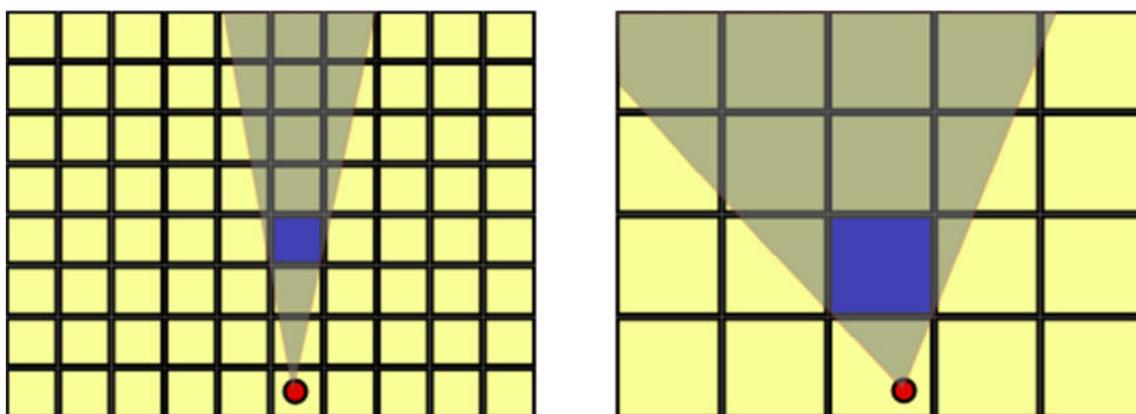


Abbildung 4-8 schematische Darstellung des Einfluss der Rasterweite auf Sichtverschattung (eigene Darstellung)

Die Rasterweite hat aber auch einen unmittelbaren Einfluss auf die benötigten Rechenzeiten für die Viewshed Analyse und alle anschließenden Rasterberechnungen. Diese steigt mit Zunahme der Auflösung stark an, so dass man einen Zugewinn an Genauigkeit nur mit Einbußen bei der Effizienz erreichen kann.

Weitere Einflussfaktoren sind außerdem die gewählte Software (verschiedene Algorithmen produzieren bei den gleichen Eingangsdaten unterschiedliche Viewsheds) und die Anzahl der Beobachterpunkte (erlauben eine detailliertere Analyse, wieviel % der Dachfläche sichtbar sind).

Bei der Denkmalschutzklassifizierung spielt die relativ „subjektive“ Klassifizierung der Eingangsdaten eine Rolle. Jeder Nutzer hat seine ganz eigenen Wertvorstellungen und würde daher die Klassifizierung der Klassen 1 bis 3 sicher mit einer gewissen Variabilität durchführen. Im Bedarfsfall kann aber die Klassifizierung relativ einfach verändert werden, so dass z.B. der Sachbearbeiter im Denkmalschutzamt mit besserem Fach- und Hintergrundwissen die Klassifizierung gezielt modifizieren kann.

Vorstellung der Ergebnisse

Bei einer Vorstellung der Ergebnisse und des Arbeitsablaufes im Rahmen eines Vereinstreffens „Energie Forum Potsdam e.V.“ im März 2012 gab es ein großes Interesse an der Analysemethodik und den Ergebnissen der Testgebiete. Auch im Gespräch mit der Ansprechpartnerin Frau Dornbusch bei der Denkmalschutzbehörde wurde ein großes Interesse an den Ergebnissen und dem Berechnungsscript geäußert. Der Behörde werden die Ergebnisdaten für die Testgebiete Bornstedt und Lennéstraße im Zuge dieser Master Arbeit als ESRI Datenbank zur Verfügung gestellt. Es wird hier noch eine Einweisung in die Handhabung des Scriptes erfolgen. Für interessierte Mitarbeiter wird eine Erläuterung zur Verwendung und Bewertung der Ergebnisdaten im Rahmen eines Vortrages erfolgen.

Frau Dornbusch äußerte auch die Möglichkeit, die Ergebnisse im Zuge von ohnehin notwendigen Ortsbegehungen in der Zukunft auf ihre Richtigkeit prüfen zu wollen. Für eine Vorab-Beurteilung der Sichtsituation sind die Daten in Zukunft aber schon einsetzbar.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die genauere Untersuchung von Solarpotenzialanalysen im Hinblick auf den Denkmalschutz am Beispiel von zwei Untersuchungsgebieten in Potsdam vorzunehmen.

Dieses Ziel konnte im Rahmen dieser Master Thesis in Form eines Python Scriptes erreicht werden.

Dabei wurden Daten verwendet, die in der heutigen Zeit für sehr viele Städte und Gemeinden flächendeckend vorliegen. Eine ähnliche Analyse kann somit auch auf andere Städte mit überschaubarem Aufwand übertragen werden. Mit der Verwendung der Software ArcGIS von ESRI wurde ein populäres und weitverbreitetes Programm genutzt, so dass die Methodik vielen Nutzern zur Verfügung gestellt werden kann.

Es wurde eine Methodik entwickelt, welche die Sichtbarkeit von potenziellen Solarstandorten mittels Viewshed Analysen berechnet und nach ihrer Bedeutung für den Denkmalschutz klassifiziert. In die Klassifikation fließen zusätzlich Flächen ein, die einen hohen Kultur- oder Freizeitwert besitzen. Im Zuge der Klassifizierungsarbeiten wurde deutlich, dass die Bewertung der Daten mit einer gewissen Subjektivität erfolgt, die das Endresultat beeinflusst. Allerdings können diese Klassen für zukünftige Berechnungen einfach angepasst werden. Das entwickelte Python Script ermöglicht eine Weiterentwicklung und -verbesserung und baut in Kombination mit den Werkzeugen von ArcGIS auf eine zukunftsfähige und populäre Software mit einer breiten Nutzerschicht auf.

Kritisch zu beurteilen ist die mangelnde Aussagefähigkeit zur erreichten Genauigkeit der Analyse. Viewshed Berechnungen lassen sich kaum verifizierbar beurteilen und sind abhängig von vielen komplexen Faktoren (Refraktion, Detailgrad des DSM, optischen Phänomenen, usw.). Visuelle Prüfungen im Feld konnten nur in sehr begrenztem Umfang durchgeführt werden und sind in der Zukunft notwendig, um eine Aussage über die Belastbarkeit der berechneten Ergebnisse zu erhalten.

Für die Bearbeiter der Denkmalschutzbehörde bieten die erhobenen Daten die Möglichkeit, sich ohne eine zeitraubende Ortsbesichtigung einen ersten Überblick über die Sichtbeziehungen einer bestimmten Dachfläche zu verschaffen. Eventuelle Probleme in

Hinsicht auf den Denkmalschutz der betroffenen Flächen lassen sich so schon im Vorfeld erkennen. Außerdem besteht die Möglichkeit, weitere Analysen direkt im Büro mit den vorhandenen Rechnern für beliebige Flächen durchzuführen.

Ausbaufähig ist in dieser Hinsicht jedoch noch die Performance des Berechnungsscripts. Die Analyse dauert mit über 15 Minuten pro Fläche sehr lang und sollte besser erst nach der Arbeitszeit auf einem leistungsfähigen PC oder Server gestartet werden. Potenzial für die Zukunft bieten hier die neuesten Entwicklungen im Bereich der Mehrkernprozessierung und Parallelisierung von Rechenschritten (Stichwort GPU).

Möglich wäre auch eine Anpassung des Scriptes, so dass in einem ersten Schritt zunächst nur eine vereinfachte Sichtbarkeitsanalyse mit sehr wenigen Dachpunkten und einem geringauflösenden DSM durchgeführt wird. Im Anschluss daran wird dann nur für die sichtbaren Bereiche eine zweite Analyse mit höhenauflösenden Daten und mehr Oberserverpunkten durchgeführt. Es müsste natürlich untersucht werden, ob bei dieser Herangehensweise keine Ergebnisflächen übersehen werden.

Ein weiterer möglicher Ausbauschnitt wäre die Integration einer zusätzlichen Bewertungsmatrix für verschiedene Solarmodule. Zum Beispiel könnte eine farbliche Anpassung der Module an die vorhandene Dachoberfläche oder die Verwendung von Dachziegelähnlichen Modulen eine PV Nutzung trotz bestehender denkmalrelevanter Sichtbeziehungen ermöglichen.

6. Literaturverzeichnis

Axelsson, 2000

Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, B4, pages 111–118, Amsterdam, Niederlande

Bauer, 2011

Manfred Bauer: Vermessung und Ortung mit Satelliten - Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, Wichmann Verlag, 6. Auflage 2011

Beringer et.al. 2011

Beringer, T., Lucht, W., Schaphoff, S.: “Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints”, *GCB Bioenergy* (2011):, Band 3, Ausgabe 4, S.299-312

Buzan, 2006

Tony Buzan; Barry Buzan, The mind map book, BBC Active Buch, Harlow, Edition von 2006

De Floriani und Magillo, 1994

Leila De Floriani, Paola Magillo: Visibility algorithms on triangulated digital terrain models, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 8, No. 1, 1994, S. 13-41,

<ftp://ftp.disi.unige.it/person/MagilloP/PS/ijgis-94.ps.gz>

De Floriani et.al., 1998

Leila De Floriani, Paola Magillo, Enrico Puppo. Efficient Implementation of Multi-Triangulations. *Proceedings Visualization '98*, 1998, S. 43-50.

De Floriani und Magillo, 2003

Leila De Floriani, Paola Magillo: Algorithms for visibility computation on terrains: a survey, *Environment and Planning B - Planning and Design*, 30(5), 2003, pp. 709-728,

<ftp://ftp.disi.unige.it/person/MagilloP/PDF/visib02.pdf>

Denkmalbereichssatzung, 1996

Satzung zum Schutz des Denkmalbereichs Berlin-Potsdamer Kulturlandschaft, gemäß Eintragung in die Liste des Kulturerbes der Welt (World Heritage List der UNESCO) vom 1. Januar 1991, Verwaltungsbereich Potsdam, 30.10.1996

http://www.potsdam.de/cms/dokumente/10014075_169830/497b0991/Ver%C3%B6ffentlichung%20im%20Amtsblatt%201.pdf

Duffie & Beckmann, 1991

J.A. Duffie, W.A. Beckman: Solar Engineering of Thermal Processes 1991, 1. Auflage, S.91-113, New York: Wiley Interscience

DWD, 2012

Deutscher Wetterdienst (DWD), Information zu Globalstrahlungsdaten und Globalstrahlungskarten in Netz

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T169000347481244102247200gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimagutachten%2FSolarenergie%2FGlobalstr_Daten_node.html%3F_nnn%3Dtrue

[aufgerufen am 01.04.2012]

Fisher, 1993

Peter F. Fisher, Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis, *International Journal of Geographical Information Systems*, 1993, Vol. 7, No. 4, S. 331-347

https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:PQRTZwXxpXwJ:www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420006377.ch10+algorithms+and+implementation+of+uncertainty+in+viewshed+analysis&hl=de&pid=bl&srcid=ADGEEShTUbxIrQoSfQYX5NDiU3BhBMIng0Dn7fbUMI5nbhKjgXeL3fWrKOSEYai1IT0iDKTxn4MIAMAG2iw4ag1MYn6PfbM95gLAEdQRwo77TRqnemmm6wd7pvsZ0jRoKZ_4yaDOLCKph&sig=AHIEtbSmU5OxT6MD7bLefyvV8AHYs3VFEQ

Fischer, 1996

Peter F. Fischer, Extending the Applicability of Viewsheds in Landscape Planning, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62 (11), 1297-1302

Franklin und Ray, 1994

Franklin W R, Ray C K. Higher isn't necessarily better: visibility algorithms and experiments. In: Waugh T C, Healey R G, eds. *Advances in GIS Research: Sixth International Symposium on Spatial Data Handling*. Edinburgh: Taylor & Francis, 1994. 751-770

<http://www.ecse.rpi.edu/~wrf/p/84-edinburgh-sdh94-higher-not-better.pdf>

Gao et al., 2011

Yong Gao, Hao Yu, Yu Liu, Yuehu Liu, Mingchao Liu, Yong Zhao, Optimization for viewshed analysis on GPU, 19th *International Conference on Geoinformatics 2011*, Page(s): 1 – 5, IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS

G. M. Foody et.al., 2009

Giles M. Foody, Timothy A. Warner, M. Duane Nellis, 2009 *The SAGE handbook of remote sensing*. London: SAGE Publications Ltd, S. 199-211 (Kapitelautoren: Juha Hyypä, Wolfgang Wagner, Markus Hollaus, Hanna Hyypä)

Goodchild, et. al., 1989

Goodchild, M.F. and Lee, J. 1989, Coverage problems and visibility regions on topographic surfaces, *Annals of Operation Research*, 20, S.175-186

Hagemann, 2002

Ingo B. Hagemann: Gebäudeintegrierte Photovoltaik, Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle, Ausgabe von 2002, S.61-75

Häberlin, 2007

Heinrich Häberlin: Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, Auflage 1 2007, S.30-61

Hoppe, 1998

H. Hoppe. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering. *Proceedings Visualization '98*, 1998, S. 35-42

Jekeli, 2001

Christopher Jekeli: „Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications“, de Gruyter, Berlin/New York, 2001

Kalman, 1960

Kalman, R. E. 1960. “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems,” *Transaction of the ASME—Journal of Basic Engineering*, pp. 35-45 (March 1960)

http://wl-s191-122.resnet.ucla.edu/book/basar_control/09.pdf

Kraus, 2003

Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie, Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. De Gruyter Verlag, Berlin

Kidner, 1996

D B Kidner, “The Visual Impact of the Taff Ely Wind Farm – A Case Study Using GIS”, in *Wind Energy Conversion 1996*, Editor: M. Anderson, London: Mechanical Engineering Publications Ltd., 1997, ISBN 1-86058-034-3, pp.205-211

Kidner, 1997

D B Kidner, “Optimal Site Selection for Wind Farms: The Role for Geographical Information Systems”, in *Wind Energy Conversion 1996*, Editor: M. Anderson, London: Mechanical Engineering Publications Ltd., 1997, ISBN 1-86058-034-3, pp.185-190

Landtwing, 2005

Stephan Landtwing: *Airborne Laser Scanning - Genauigkeitsinformationen für den Auswertungsprozess*. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich

Laschinski und Zanger, 2009

Joachim Laschinski, Stefan Zanger: *Wo Licht ist, ist auch mal Schatten - Effiziente Nutzung von PV-Generatoren mit zeitweiliger Verschattung*, SMA Solar Technology AG, Sonnenallee1, D – 34266 Niestetal

http://www.photovoltaik.eu/fileadmin/uploads/PDFs/Verkaufshilfe/n/SMA_Veroeffentlichung_OptiTrac_Global_Peak.pdf

[aufgerufen am 02.04.2012]

Lee, 1991

Lee, J., 1991 Analyses of visibility sites on topographic surfaces, *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, London: Taylor and Francis Ltd, S. 413-429)

Liu et al., 2010

Liu Liu; Liqiang Zhang; Chen Chen; Hong Chen; , "An Improved LOS Method for Implementing Visibility Analysis of 3D Complex Landscapes," *Computer Science and Software Engineering*, 2008 *International Conference on* , vol.2, no., pp.874-877, 12-14 Dec. 2008, doi: 10.1109/CSSE.2008.1157

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4722188&isnumber=4721981>

Ludwig, Klärle und Lanig, 2008

Ludwig, D.; Klärle, M.; Lanig: Automatisierte Standortanalyse für die Solarnutzung auf Dachflächen über hochaufgelöste Laserscanningdaten. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2008 – Beiträge zum 20. AGIT-Symposium Salzburg*, 466 - 475. Wichmann, Heidelberg.

Magalhães et al., 2010

Magalhães, S.V.G.; Andrade, M.V.A.; Franklin, W.R.; , "An optimization heuristic for siting observers in huge terrains stored in external memory," *Hybrid Intelligent Systems (HIS)*, 2010 *10th International Conference on*, vol., no., pp.135-140, 23-25 Aug. 2010

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5600013&isnumber=5600012>

Pfeiffer, 2003

Norbert Pfeifer, Oberflächenmodelle aus Laserdaten, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI)* Heft 4/2003, 243-252

Rana, 2003

Sanjay Rana, (2003) Fast approximation of visibility dominance using topographic features as targets and the associated uncertainty, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (8) 881 – 888

http://www.asprs.org/a/publications/pers/2003journal/august/2003_aug_881-888.pdf

Schnadt, Katzenbeisser, 2004

Schnadt, K., Katzenbeißer, R., Unique Airborne Fiber Scanner Technique for Application-Oriented LIDAR Products, *Conference Paper ISPRS Volume XXXVI-8/W2*, 2004, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment,

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W2/SCHNADT.pdf>

Shellito et. al., 2004

Shellito, B. A. Dixon, J. Inge, C. O Neal, J., GIS and 3D Modeling for Tourism Visual Viewscape Issues, *Tourism Analysis*, 2004, Vol. 9, No. 3, S. 167-178

Stadt Potsdam, Integriertes Klimaschutzkonzept, 2010

Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (2010), Integriertes Klimaschutzkonzept für die Landeshauptstadt Potsdam [pdf], S.21, Stadt Potsdam

http://www.potsdam.de/cms/dokumente/10069761_978696/a89a339e/IntegriertesKlimaschutzkonzept2010.pdf

[aufgerufen am 24.10.2011]

Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung, 2009

J. Albertz, M. Wiggenhagen, Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung, Kalman Filter, S. 65-66, Wichmann Verlag, 2009

Turner et. Al., 2001

Turner, A and Doxa, M and O'Sullivan, D and Penn, A (2001) From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. *ENVIRON PLANN B*, 28 (1) 103 - 121.

<http://discovery.ucl.ac.uk/160/1/turner-doxa-osullivan-penn-2001.pdf>

Vanicek, 2011

Philipp Vanicek, Verschattung – Berücksichtigung und Minimierung von Ertragsverlusten, Vortrag vom Expertenkreis Photovoltaik im SolarZentrum Hamburg, Zum Handwerkszentrum 1, 21079 Hamburg,

http://www.solarzentrum-hamburg.de/download/111116_Verschattung_pv.pdf

[aufgerufen am 02.04.2012]

VGH BW, 2011

Verwaltungsgerichtshof Baden Württemberg, Pressemitteilung vom 22.09.2011, Denkmalschutz kontra Klimaschutz Fotovoltaikanlage auf denkmalgeschützter Pfarrscheuer,

<http://www.vgh-mannheim.de/servlet/PB/menu/1271433/index.html?ROOT=1153033> [aufgerufen am 03.02.2012]

Vosselman, 2000

Georg Vosselman,. Slope based filtering of laser altimetry data. *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, B3, pages 935–942, Amsterdam, Niederlande

Vosselman, 2008

George Vosselman,: Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII-3A, S. 99-104,

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3_pdf/15.pdf

Wagner et.al., 2004

Wagner, W., Ullrich, A., Briese C.: „Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche“, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 91. Jahrgang (2003), 4, S. 223 – 235

Wang et al., 1996

Wang, J., Robinson, G. J., White, K., 1996. A Fast Solution to Local Viewshed Computation Using Grid-Based Digital Elevation Models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (10), 1157-1164,

http://www.asprs.org/a/publications/pers/96journal/october/1996_oct_1157-1164.pdf

Wang et al., 2000

Wang J, Robinson G J, White K. Generating viewsheds without using sightlines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66: 87-90

http://www.asprs.org/a/publications/pers/2000journal/january/2000_jan_87-90.pdf

Wedel, 2007

Jan Wedel: Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation, Wissenschaftsverlag Oldenburg, 2007

Wheatley, 1995

Wheatley, D., 1995, Cumulative viewshed analysis: a GIS based method of investigating intervisibility and its archaeological application. In *Archaeology and GIS: A European Perspective*, edited by G. Lock and Z. Stancic (London: Taylor and Francis), pp. 171–185

<http://www.southampton.ac.uk/~dww/Cumulative/cum.html>

Xia et al., 2010

Yingjie Xia, Yang Li, Xingmin Shi, Parallel Viewshed Analysis on GPU Using CUDA, 2010 *Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization (CSO)*, 28-31.05.2010, Volume 1, Page(s): 373 - 374

Yalcin et al., 2011

M. Adil Yalçın, Kenneth Weiss and Leila De Floriani, GPU Algorithms for Diamond-based Multiresolution Terrain Processing, *Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, EGPGV 2011, Llandudno, Wales, UK, 2011. Proceedings,

<http://www.cs.umd.edu/~kweiss81/papers/Yalcin11.egpgv.pdf>

Young et al., 2004

K. Young-Hoon, S. Rana, and S. Wise. Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimization techniques. *Computers and Geosciences*, 30:1019–10323, 2004

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Übersicht mit den Testgebieten und Laserdaten.....	8
Abbildung 2-2 Holländisches Viertel.....	9
Abbildung 2-3 Garnisonskirche, 1827 Gemälde von Hasenpflug (Quelle: Wikipedia).....	9
Abbildung 2-4 Belvedere Pfingstberg.....	10
Abbildung 2-5 Neues Palais und Communs im Park Sanssouci (Quelle: Wikipedia).....	10
Abbildung 2-6 Pfarrkirche Bornstedt (Quelle: Wikipedia, Urheber: Karsten Knuth).....	11
Abbildung 2-7 Laserscanning vom Flugzeug aus (Lindenberger, 2003).....	13
Abbildung 2-8 Reflektionen des Lasers an der Oberfläche (Echos).....	13
Abbildung 2-9 Positionsbestimmung mit 3 GPS Satelliten (Quelle: kowoma.de).....	15
Abbildung 2-10 Klassifizierte LIDAR Punkte (Gebäude in Rot, Bäume in Grün und Wasser in Blau), Quelle: Carlberg et al. (2008).....	19
Abbildung 2-11 Projektgebiet Potsdam für den Laserscanningflug	20
Abbildung 2-12 Schattiertes und coloriertes DTM mit groben Fehlern (rot umrandet).....	21
Abbildung 2-13 solare Einstrahlung (Quelle: ESRI)	22
Abbildung 2-14 Karte der Globalstrahlung Jahresmittel von 1981 – 2010 (Quelle: DWD).....	25
Abbildung 2-15 optimale Ausrichtung und Dachneigung (Quelle: AS Solar)	26
Abbildung 2-16 PV-Attributtabelle für das Bornstädter Pfarrhaus (türkis umrandet).....	29
Abbildung 2-17 Denkmalschutzbereiche im Projektgebiet Potsdam	31
Abbildung 3-1 Anforderungsschema für das Lösungswerkzeug.....	33
Abbildung 3-2 Konstruktion eines Geländeprofiles	36
Abbildung 3-3 fünf verschiedene Methoden zur Höhenbestimmung nach Fischer.....	37
Abbildung 3-4 Viewshed Analyse mit sichtbaren Bereichen in Rot	38
Abbildung 3-5 verkleinerte Version der Mind Map dieser MT.....	41
Abbildung 3-6 vereinfachter Ablaufplan der Analysemethode	41
Abbildung 3-7 Entwurf des Analysescripts im Model Builder.....	48
Abbildung 3-8 Einschränkungen bei der Sichtbarkeitsanalyse und Reduzierung der Ergebnismenge auf "Fußgängerniveau"	49
Abbildung 3-9 sichtbare Flächen ohne Reduzierung.....	51
Abbildung 3-10 sichtbare Flächen nach der Reduzierung mit Conditional.....	51
Abbildung 3-11 Funktionsprinzip Intersect Werkzeug.....	52
Abbildung 3-12 Scriptparameter in ArcMap	58

Abbildung 3-13 Ablaufschema der Sichtbarkeitsanalyse der Aussichtstürme	60
Abbildung 4-1 Pfarrkirche Bornstedt (türkis).....	62
Abbildung 4-2 Denkmalschutzkategorien, abgestuft von Rot (4) nach Grün (1).....	63
Abbildung 4-3 Ergebnistabellen, links: Sichtbarkeitsanalyse mit Denkmal- Klassifizierung, rechts: Sichtbarkeit von Aussichtstürmen	64
Abbildung 4-4 Blick Normannischer Turm zu Pfarrkirche Bornstedt.....	65
Abbildung 4-5 Blick Norm. Turm Richtung Orangerie.....	65
Abbildung 4-6 Blick Norm. Turm Richtung Bornstedt (ohne Zoom)	65
Abbildung 4-7 visuelle Darstellung der klassifizierten Sichtbarkeitsflächen	66
Abbildung 4-8 schematische Darstellung des Einfluß der Raterweite auf Sichtverschattung	68

Erweiterte Quellenangabe zu Internetquellen:

Abbildung 2 2 Holländisches Viertel:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/HollViertel.jpg>, von Nutzer Creando, 08.08.2005

Abbildung 2 3 Garnisonskirche, 1827 Gemälde von Hasenpflug (Quelle: Wikipedia)

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Garnisonkirche_um_1827.jpg

Abbildung 2 5 Neues Palais und Communs im Park Sanssouci (Quelle: Wikipedia),

Foto von Brian W., 30.10.2006,

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Neues_Palais_Potsdam_Sanssouci_Luftansicht.jpg

Abbildung 2 15 optimale Ausrichtung und Dachneigung (Quelle: AS Solar):

<http://www.as-solar.com/de/photovoltaik.html>

Abbildung 2 6 Pfarrkirche Bornstedt (Quelle: Wikipedia, Urheber: Karsten Knuth):

http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Die_Bornstedter_Kirche.JPG#metadata

Abbildung 2 9 Positionsbestimmung mit 3 GPS Satelliten (Quelle: kowoma.de):

http://www.kowoma.de/gps/gps_posb_3.gif

Abbildung 2 10 Klassifizierte LIDAR Punkte (Gebäude in Rot, Bäume in Grün und Wasser in Blau), Quelle: Carlberg et al. (2008)

http://www-video.eecs.berkeley.edu/papers/mcarlberg/classification_cvprSubmitted.pdf

Abbildung 2 13 solare Einstrahlung (Quelle: ESRI):

http://webhelp.esri.com/arcgisSDEsktop/9.3/published_images/SAc_Solar_Insolation.gif

Abbildung 2 14 Karte der Globalstrahlung Jahresmittel von 1981 – 2010 (Quelle: DWD):

http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU1/KU12/Klimagutachten/Solarenergie/Straka_Mittel_8110,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Straka_Mittel_8110.pdf

Abbildung 3 2 Konstruktion eines Geländeprofiles:

http://3.bp.blogspot.com/_57jRgDt4zro/SR7nh-CHmzI/AAAAAAAAARM/5uDhakImi3g/s400/Topographic+profile.gif

auf der Seite: <http://earthscience-longoria.blogspot.de/2008/11/constructing-and-interpreting.html>

Abbildung 3 4 Viewshed Analyse mit sichtbaren Bereichen in Rot:

http://www.innovativegis.com/basis/mapanalysis/topic15/Topic15_files/image021.png

Abbildung 3 8 Einschränkungen bei der Sichtbarkeitsanalyse und Reduzierung der Ergebnismenge auf "Fußgängerniveau", eigene Darstellung mit Teilquellen von:

http://www.cliparts101.com/free_clipart/25559/house_christoph_brill_01.aspx und
http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Logo_man.svg

Abbildung 3 11 Funktionsprinzip Intersect Werkzeug:

<http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/0008/GUID-93B78EC9-4024-43AC-87BF-765FAD873B00-web.gif>

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	8
Tabelle 2-2	28
Tabelle 2-3	30
Tabelle 2-4	31
Tabelle 3-1	44
Tabelle 3-2	46
Tabelle 3-3	60

9. Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
EJ	Exajoule, $1\text{EJ} = 10^{18}\text{J}$
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
OSM	Open Street Map
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
VHG	Verwaltungsgerichtshof
DWD	Deutscher Wetterdienst
KW_p	Kilowatt Peak, d.h. Spitzenleistung unter Standardbedingungen (Temperatur: 25°C , Bestrahlungsstärke: $1000\text{W}/\text{m}^2$, Luftmasse (AirMass): 1,5AM)
LOS	Line of Sight (Sehstrahl)
ZVI	Zone of Visual Influence, auch Viewshed oder Sichtbarkeitskarte genannt
SSD	engl. Solid State Drive, Festspeicherplatte bzw. Halbleiterlaufwerk
GPU	Grafikprozessor (engl.: Graphics Processing Unit)
CUDA	engl.: Compute Unified Device Architecture, Programmierschnittstelle für GPU's
SBET	beste geschätzte Trajektorie, engl.: smoothed best estimation trajectory
GDB	Geodatenbank in ArcGIS, engl.: (file) geodatabase

```
1  ## Python Script zur Berechnung von Sichtbarkeitsanalysen inklusive einer Klassifizierung nach
   ## Denkmalschutzverträglichkeit
2  ##
3  ## Parameters:
4  ## 0 (input) - Input Features (Feature Layer)
5  ## 1 (input) - Input Features_05 (Feature Layer)
6  ## 2 (input) - Selecting Features (Feature Layer)
7  ## 3 (input) - Selecting Features Field (Field, obtained from Selecting Features)
8  ## 4 (input) - Output Workspace (Scratch-Workspace)
9  ## 5 (output, derived) - Output Feature Class(es) (Feature Class, multivalued)
10 ## 6 (input) - radius2 Double input value
11
12 ## Autor: Romy Schröder, U1447, November 2011
13 # -----
14
15 # Import arcpy module
16 import arcpy
17 import sys                                     #import von sys, um "exit" auszuführen
18 from arcpy import env
19
20 env.overwriteOutput = True                   #erlaubt Überschreiben von Dateien
21
22 # Check out any necessary licenses
23 arcpy.CheckOutExtension("3D")
24 arcpy.CheckOutExtension("spatial")
25
26 # Set Geoprocessing environments
27 inputFeatures = arcpy.GetParameterAsText(0)
   ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_Scratch.gdb\\DSM_2m_Solaranalyse"
28 inputFeatures_05 = arcpy.GetParameterAsText(1)
   ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_Scratch.gdb\\DSM_05m_Solaranalyse"
29 selectingFeatures = arcpy.GetParameterAsText(2)
   ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_Scratch.gdb\\Solarpot_PotsdamPVend"
30 selectingFeaturesFieldName = arcpy.GetParameterAsText(3)   #"OBJECTID_12"
31 outputWorkspace = arcpy.GetParameterAsText(4)              ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_Scratch.gdb"
32 env.workspace = outputWorkspace                            ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_Scratch.gdb"
33 env.scratchWorkspace = arcpy.GetParameterAsText(5)         ##"D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb"
34 radius2 = arcpy.GetParameterAsText(6)                      # maximaler Radius für die Sichtbarkeitsanalyse
35
36 # Global Variables
37 Viewshed_result = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Viewshed_result_temp"
   ##Festlegen der temporären Dateinamen
38 Sichtbarkeit_mal100 = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_mal100_temp"
```

```
                                     #und Speicherplätze
39 Sichtbarkeit_normal = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_normal_temp"
40 Sichtbarflt = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarflt_temp"
41 Sichtbarkeit_1_8m = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_1_8m_temp"
42 Sichtbarkeit_1_8_int = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_1_8_int_temp"
43 Sichtbarkeit_1_8_poly = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_1_8_poly_temp"
44 Sichtbarkeit_1_8m_20bis100 = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_1_8m_20bis100_temp"
45 Sichtbarkeit_klassifiziert = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_klassifiziert_temp"
46 Sichtbarkeit_klassifiziert_Zusammenfassung =
   "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Sichtbarkeit_klassifiziert_Zusammenfassung_temp"
47 DSM_minus_DTM = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\DSM_minus_DTM_7stellig"
                                     #Datei muss vorhanden sein!
48 Klassifizierung_Denkmal_join_Baudenkmal =
   "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\Klassifizierung_Denkmal_join_Baudenkmal"           #Datei muss
   vorhanden sein!
49 dsm_ges_02m_7stellig = "D:\\UniGIS\\MT\\Daten\\Bearbeitung\\MT_scratch.gdb\\dsm_ges_05m_7stellig"
                                     #Datei muss vorhanden sein!
50
51
52 # Local variables:
53 Solarpot_PotsdamPVend = selectingFeatures
54 DSM_05m_Solaranalyse = inputFeatures
55 v_100 = "100"
56
57 # -----Berechnungsbeginn-----
58 # Erfassung der vom Benutzer selektierten Untersuchungsflächen (Ergebniss der PV-Analyse)
59
60 arcpy.AddMessage("Current workspace: %s" % outputWorkspace)           # Ausgabe des aktuellen
   Ausgabe-Workspace
61
62 inputLayer = arcpy.MakeFeatureLayer_management(inputFeatures)           #legt einen neuen
   Feature Layer an (inputLayer=DSM Punkte, dieser ist zunächst temporär), Inhalt ist aus inputFeatures
63 inputLayer_05 = arcpy.MakeFeatureLayer_management(inputFeatures_05)
64 selectingLayer = arcpy.MakeFeatureLayer_management(selectingFeatures)   #kopiert die selektieren
   Features in den neuen Layer (selectingLayer)
65
66 desc = arcpy.Describe(inputLayer)           #Describe Funktion liest
   den Inhalt des DSM-Punkt-Layers "DSM_05m_Solaranalyse" (Name, Fields usw.)
67 inputLayerName = desc.name           #"befüllt"
   inputLayerName mit dem aktuellen Layernamen
68 desc =arcpy.Describe(inputLayer_05)
69 inputLayerName_05 = desc.name
70
```

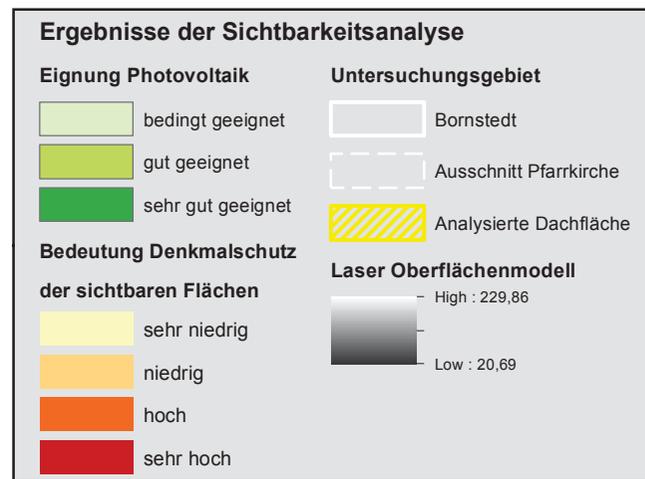
```
71 desc = arcpy.Describe(selectingLayer) #Describe Funktion liest
den Inhalt des Layers "Solarpot_PotsdamPVend" mit den Hausumringen (Name, Fields usw.)
72 selectingLayerName = desc.name #Übertragen des
Solar-Layer Namens in Variable selectingLayerName
73 selectingLayerShapeFieldName = desc.featureClass.shapeFieldName #Übertragen des
FieldNames aus Solar-Layer (ID)
74
75 try:
76     outputFCs = [] #Anglegen einer Variable
als leere Liste
77     rows = arcpy.SearchCursor(selectingLayer) #Zuweisen des Iterators
"rows" zu selektierten Features in den neu angelegten Layer
78     for row in rows: #Schleife: für jeden
Umring im neuen Layer (selecting Layer = ausgewählte Solarpot_PotsdamPVend-Features) soll ausgeführt werden...
79         arcpy.management.SelectLayerByLocation(inputLayer, "HAVE_THEIR_CENTER_IN", row.getValue(
selectingLayerShapeFieldName), "", "NEW_SELECTION") #wählt alle Punkte innerhalb des Dachumrings und greift die
Dach-ID ab
80         count = int((arcpy.GetCount_management(inputLayer))[0]) #zählt die DTM Punkte
pro Haus
81         if (count > 3): #für mehr als 4 Punkte
führe folgende Anweisung aus...
82             rowValue = str(row.getValue(selectingFeaturesFieldName)) #wandelt den fieldName
des Hauses in einen String um und füllt damit die Variable rowValue
83             arcpy.AddMessage("%d feature(s) von Layer %s wurden in %s (%s: %s) gefunden " % (count, inputLayerName,
selectingLayerName, selectingFeaturesFieldName, rowValue))
84             outputFC = "TH_" + inputLayerName + "_" + rowValue #die String Variable
outputFC setzt sich zusammen aus dem Namen des DSM Layers und der Haus-ID (rowValue)
85             arcpy.AddMessage("Schreibe Resultat in Layer %s" % outputFC)
86             arcpy.CopyFeatures_management(inputLayer, outputFC) #Kopiert die
selektierten DSM Punkte in einen neuen Layer mit dem Namen in outputFC
87             outputFCs.append(outputFC) #appends each output
feature class (created by the CopyFeatures command) to the list object
88         else:
89             arcpy.management.SelectLayerByLocation(inputLayer_05, "HAVE_THEIR_CENTER_IN", row.getValue(
selectingLayerShapeFieldName), "", "NEW_SELECTION")
90             count = int((arcpy.GetCount_management(inputLayer_05))[0])
91             if (count > 0): #für mehr als 0 Punkte
führe folgende Anweisung aus...
92                 rowValue = str(row.getValue(selectingFeaturesFieldName)) #wandelt den fieldName
des Hauses in einen String um und füllt damit die Variable rowValue
93                 arcpy.AddMessage("%d feature(s) von Layer %s wurden in %s (%s: %s) gefunden " % (count, inputLayerName_05
, selectingLayerName, selectingFeaturesFieldName, rowValue))
94                 outputFC = "TH_" + inputLayerName_05 + "_" + rowValue #die String Variable
```

```
    outputFC setzt sich zusammen aus dem Namen des DSM Layers und der Haus-ID (rowValue)
95         arcpy.AddMessage("Schreibe Resultat in Layer %s" % outputFC)
96         arcpy.CopyFeatures_management(inputLayer_05, outputFC)                                #Kopiert die
selektierten DSM Punkte in einen neuen Layer mit dem Namen in outputFC
97         outputFCs.append(outputFC)
98         else:                                                                              #Fehlerabfrage, wenn
keine DSM Punkte im gewählten Objekt liegen, Beenden des Scripts falls IF und ELIF FALSE
99         rowValue = str(row.getValue(selectingFeaturesFieldName))
100        arcpy.AddMessage("Für das Objekt mit %s = %s liegen keine DSM Infomrationen vor. Bitte prüfen Sie die
Eingangsdaten!" % (str(selectingFeaturesFieldName), rowValue))
101        sys.exit()
102
103        del row, rows
104        arcpy.SetParameterAsText(5, ";".join(outputFCs))                                #konvertiert die
Objektliste in einen durch ";" getrennten Text, durch den Parameter wird
105        arcpy.AddMessage("\nFeatureauswahl beendet, weitere Berechnung erfolgt...")        #ArcMap mitgeteilt, dass
ein output des Typs FeatureClass erzeugt wurde, der automatisch der
106                                                                                          #Map zugefügt wird
(mehrere Layer, da Multivalue-Objekt)
107        #Start der eigentlichen Berechnungen als Schleifendurchlauf durch FCs
108
109        FCs = []
110        FCs = outputFCs
111        for FC in FCs:
112            Objektname = str(FC)
113            arcpy.AddMessage("Berechnung für Feature #: %s" % Objektname)
114
115            #Add Radius2 to Observer Points
116            arcpy.AddField_management(FC, "RADIUS2", "SHORT", "", "", "10", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")
117            arcpy.CalculateField_management(FC, "RADIUS2", radius2, "", "")
118            arcpy.AddMessage(str(radius2))
119
120            # Process: Get Count (Ermittelt die Anzahl der DTM Punkte innerhalb der Dachfläche, später für die
"Normalisierung" der Viewshed Ergebnisse gebraucht)
121            Row_Count = arcpy.GetCount_management(FC)
122            arcpy.AddMessage("Anzahl der Punkte im Haus : %s" % (Row_Count, ))
123
124            # Process: Viewshed (Viewshed-Analyse für die ausgewählten Punkte)
125            arcpy.AddMessage("Berechnung des Viewshed läuft")
126            arcpy.Viewshed_3d(dsm_ges_02m_7stellig, FC, Viewshed_result, "1", "CURVED_EARTH", "")
127
128            # Process: Times (Mutliplikation mit 100)
129            arcpy.AddMessage("Berechnung Times läuft")
```

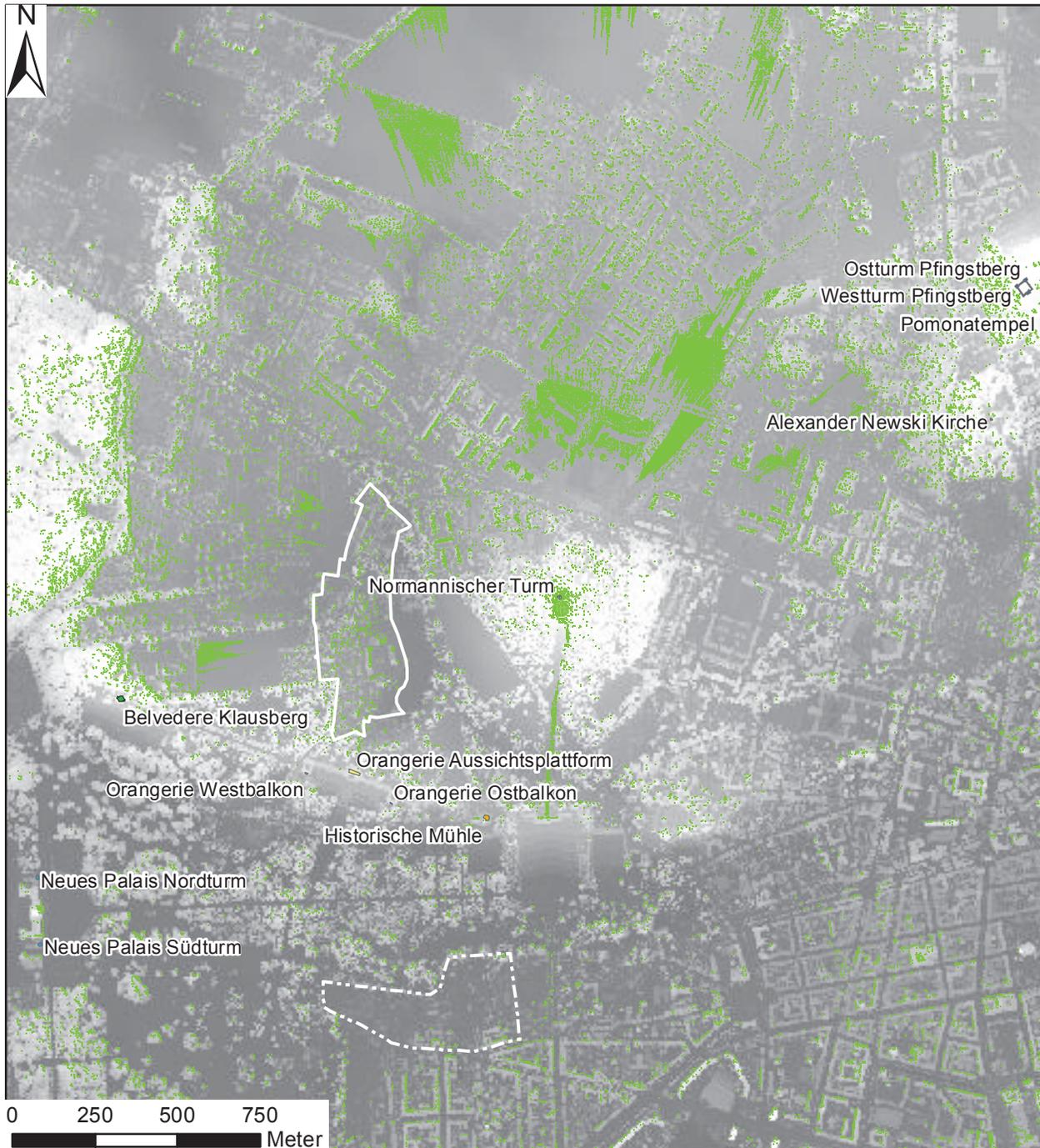
```
130     arcpy.Times_3d(Viewshed_result, v__100, Sichtbarkeit_mal100)
131
132     # Process: Divide (Teilen durch Punktzahl)
133     arcpy.AddMessage("Berechnung Divide läuft")
134     arcpy.Divide_3d(Sichtbarkeit_mal100, Row_Count, Sichtbarkeit_normal)
135
136     # Process: Float (Umwandlung in Fließkommazahl-Raster)
137     arcpy.AddMessage("Berechnung Float läuft")
138     arcpy.Float_3d(Sichtbarkeit_normal, Sichtbar_flt)
139
140     # Process: Con (Eliminierung aller Sichtflächen mit Objekthöhe >= 1,8m)
141     arcpy.AddMessage("Berechnung Con läuft")
142     arcpy.gp.Con_sa(DSM_minus_DTM, Sichtbar_flt, Sichtbarkeit_1_8m, "", "\"VALUE\" <= 1,8")
143
144     # Process: Int (Umwandlung in ein Ganzzahl-Raster)
145     arcpy.AddMessage("Berechnung Int läuft")
146     arcpy.Int_3d(Sichtbarkeit_1_8m, Sichtbarkeit_1_8_int)
147
148     # Process: Raster to Polygon (Konvertierung Raster zu Polygonfeature)
149     arcpy.AddMessage("Berechnung Raster to Polygon läuft")
150     arcpy.RasterToPolygon_conversion(Sichtbarkeit_1_8_int, Sichtbarkeit_1_8_poly, "NO_SIMPLIFY", "VALUE")
151
152     # Process: Select (2) (Auswahl der sichtbaren Flächen, d.h. mit mind. 1 sichtbaren Oberserverpoint)
153     arcpy.AddMessage("Berechnung Select 2 läuft")
154     arcpy.Select_analysis(Sichtbarkeit_1_8_poly, Sichtbarkeit_1_8m_20bis100, "\"grid_code\" > 0")
155
156     # Process: Define Projection (Definition des Koordinatensystems)
157     arcpy.AddMessage("Berechnung Define Projection läuft")
158     arcpy.DefineProjection_management(Sichtbarkeit_1_8m_20bis100,
159     "PROJCS['ETRS_1989_UTM_Zone_33N',GEOGCS['GCS_ETRS_1989',DATUM['D_ETRS_1989',SPHEROID['GRS_1980',6378137.0,298.257222101]],
160     PRIMEM['Greenwich',0.0],UNIT['Degree',0.0174532925199433]],PROJECTION['Transverse_Mercator'],PARAMETER['False_Easting',500
161     000.0],PARAMETER['False_Northing',0.0],PARAMETER['Central_Meridian',15.0],PARAMETER['Scale_Factor',0.9996],PARAMETER['Latitude_Of_Origin',0.0],UNIT['Meter',1.0]]")
162
163     # Process: Intersect (räumliche Verschneidung mit Denkmalschutzklassifizierung)
164     arcpy.AddMessage("Berechnung Intersect läuft")
165     infeatures = [Sichtbarkeit_1_8m_20bis100,Klassifizierung_Denkmal_join_Baudenkmal]
166     arcpy.Intersect_analysis(infeatures , Sichtbarkeit_klassifiziert, "ALL", "", "INPUT")
167
168     # Process: Dissolve (Zusammenführen von Flächen mit gleichen Attributen)
169     arcpy.AddMessage("Berechnung Dissolve läuft")
170     arcpy.Dissolve_management(Sichtbarkeit_klassifiziert, Sichtbarkeit_klassifiziert_Zusammenfassung,
171     "grid_code;Klassifizierung_DS", "Shape_area SUM", "MULTI_PART", "DISSOLVE_LINES")
```

```
168
169     #Kopieren der Analyseergebnisse
170     Speichername = Objektname + "_result_" + str(radius2)
171     arcpy.AddMessage("Kopieren der Ergebnisse: %s" % Speichername)
172     arcpy.Copy_management(Sichtbarkeit_klassifiziert_Zusammenfassung, Speichername)
173
174     arcpy.AddMessage("-----nächster Schleifendurchlauf-----")
175
176 #Schleifenende, Löschen der temporären Daten und Cleanup
177
178     del FC, FCs                                     # Löschen der rows and Liste
179     del outputFC, outputFCs
180
181     arcpy.AddMessage("Schleife beendet, Löschen der temporären Daten erfolgt")
182
183     rasterList = []
184     rasterList = arcpy.ListRasters("*_temp*", "GRID")
185     for raster in rasterList:
186         arcpy.AddMessage("lösche Raster: %s" % raster)
187         arcpy.Delete_management(raster)
188
189     lstFCs = arcpy.ListFeatureClasses("*_temp*", )
190     for FCs in lstFCs:
191         arcpy.AddMessage("lösche Feature Classes: %" % FCs)
192         arcpy.Delete_management(FCs)
193
194     except:                                         #try-except fängt Fehler innerhalb des
195     Codeabschnittes ab und gibt eine Fehlermeldung aus
196     arcpy.AddMessage(arcpy.GetMessages(2))
197     print arcpy.GetMessages(2)
198
199
200
```

Ergebniss einer Sichtbarkeitsanalyse am Beispiel des Pfarrhauses Bornstedt



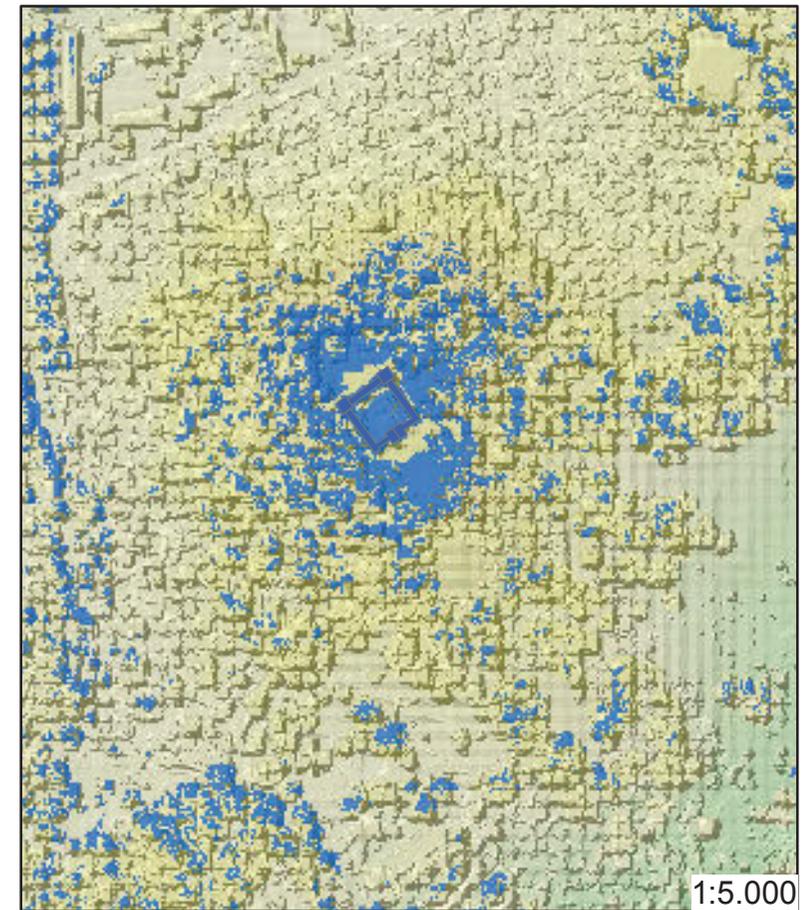
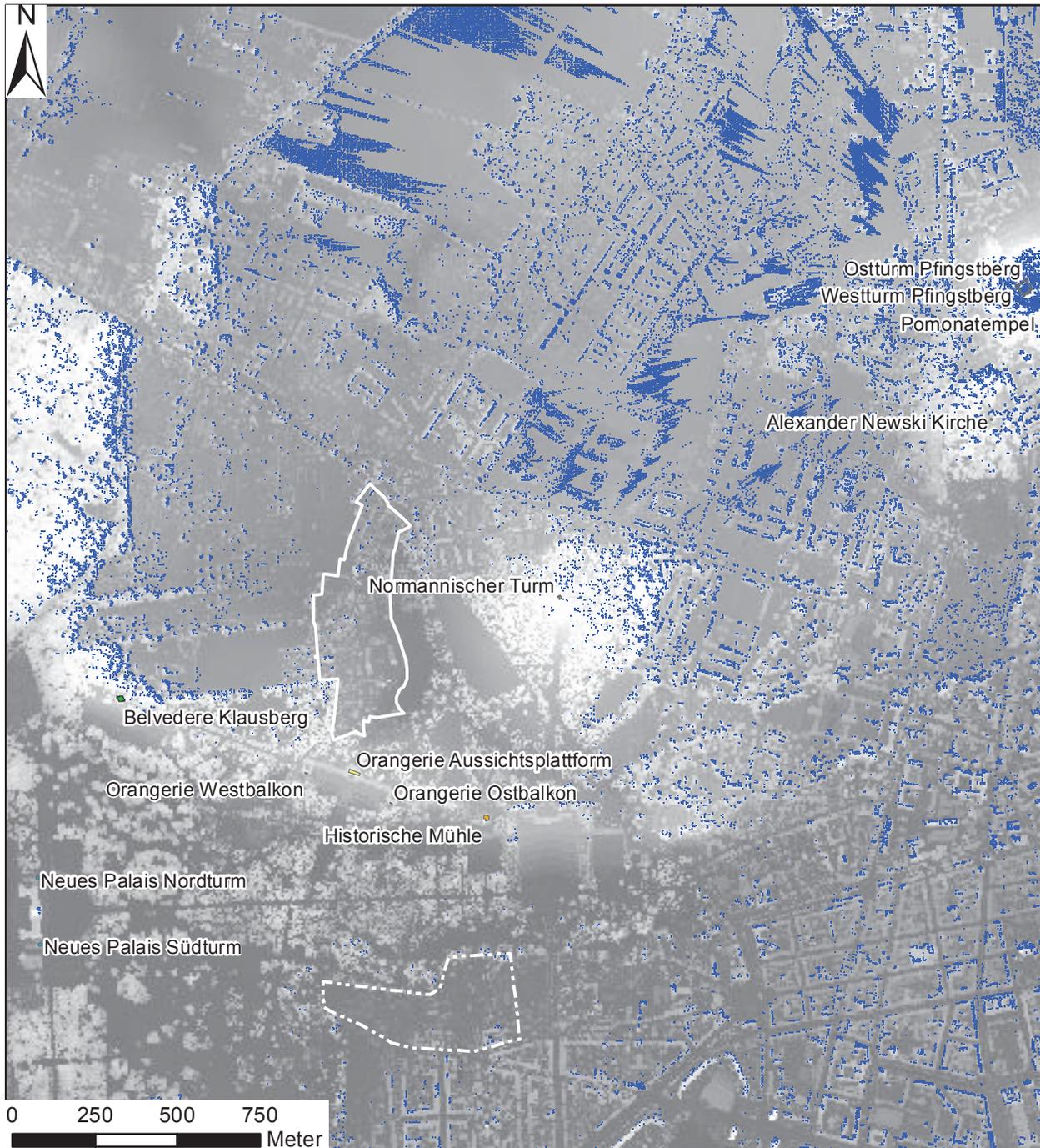
Aussicht vom Normannischen Turm auf dem Ruinenberg



von Aussichtstürmen aus sichtbare Gebiete:



Aussicht vom Belvedere auf dem Pflingstberg



von Aussichtstürmen aus sichtbare Gebiete:

- Westturm Pflingstberg
- Treppen und Gänge Pflingstberg 16
- Verbindungsgang Türme Pflingstberg 17
- Ostturm Pflingstberg 18

Untersuchungsgebiet

- Bornstedt
- Lennéstraße, zu analysieren

Laser Oberflächenmodell



DSM Hillshade

