

**Alexander Wollert**

Visualisierung von Photovoltaik-Anlagen  
und deren Auswirkungen auf den  
Flugbetrieb am Beispiel des Flughafen  
Frankfurts

**Diplomarbeit**

# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

## **Impressum:**

Copyright © 2011 GRIN Verlag  
ISBN: 9783656028550

## **Dieses Buch bei GRIN:**

<https://www.grin.com/document/178531>

**Alexander Wollert**

**Visualisierung von Photovoltaik-Anlagen und deren  
Auswirkungen auf den Flugbetrieb am Beispiel des  
Flughafen Frankfurt**

## **GRIN - Your knowledge has value**

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite [www.grin.com](http://www.grin.com) ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

### **Besuchen Sie uns im Internet:**

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

[http://www.twitter.com/grin\\_com](http://www.twitter.com/grin_com)

# Visualisierung von Photovoltaik-Anlagen und deren Auswirkungen auf den Flugbetrieb am Beispiel des Flughafen Frankfurts

## Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Informatikers  
im Studiengang Computervisualistik

vorgelegt von  
Alexander Wollert

Koblenz, im September 2011

## Aufgabenstellung für die Diplomarbeit Alexander Wollert

### **Titel:            Visualisierung von Photovoltaik-Anlagen und deren Auswirkungen auf den Flugbetrieb am Beispiel des Flughafens Frankfurt**

Photovoltaik-Anlagen werden immer populärer auch in Gebieten, die nicht starkem Sonnenschein ausgesetzt sind. Daher ist es wichtig, die Auswirkungen von Photovoltaik-Anlagen am Standort des Flughafens Frankfurt mit dem besonderen Augenmerk auf den Einfluss des Luftverkehrs zu beurteilen.

Die Diplomarbeit soll einen Beitrag zur Visualisierung von Photovoltaik-Anlagen und deren möglichen Blendeffekten auf anfliegende oder abfliegende Luftfahrzeuge aufzeigen.

Es soll ein Konzept erstellt werden, wie die Blendeffekte von Photovoltaik-Anlagen auf Lotsen und Piloten für beliebige Standorte am Flughafen Frankfurt modelliert und bewertet werden können. In diesem Zusammenhang soll geprüft werden, ob sich zukünftig diese Visualisierungen in einem bestehenden Visualisierungstool, dem CyViation Animator, realisieren lassen.

Anhand eines Modelles in Autodesk Maya soll dann die Auswirkung der verschiedenen Verortungsmöglichkeiten an der Lärmschutzwand bei unterschiedlichen Wetterbedingungen visualisiert werden. Dabei sollen die verschiedenen Wetterbedingungen, die Lage der Photovoltaik-Anlagen und deren Auswirkung auf Piloten und Lotsen analysiert und bewertet werden.

#### Methodisches Vorgehen:

- Literaturrecherche zum Thema Photovoltaik-Anlagen (Unterschiede im Aufbau, Verortung, Betrieb, Blendeffekte)
- Einarbeitung in Autodesk Maya
- Gegenüberstellung der verschiedenen Photovoltaik-Anlagen und deren möglichen Realisierungen sowie Einflussfaktoren auf den Flugbetrieb
- Konzept für die Realisierung für zukünftige Untersuchungen bei Nutzung von anderen Standorten und ggf. Konzepterstellung für eine Umsetzung in das Programm CyViation Animator darlegen
- Visualisierung der Photovoltaik-Anlagen in Maya mit einem bereits bestehenden Modell des Frankfurter Flughafens
- Visualisierung der ggf. entstehenden Blendeffekte bei verschiedenen Wetterbedingungen (verschiedene Sonnenstände, Nebeneffekte wie Schnee oder Regen)
- Dokumentation und Präsentation der Ergebnisse

# Danksagung

---

Ich möchte mich herzlich bedanken bei allen, die mir bei der Verwirklichung dieser Arbeit geholfen haben. Das Thema der Diplomarbeit stammt von Herrn Steffen Wendeberg, dem Leiter der Abteilung IL2 (Infrastruktur Luftseite 2) der Fraport AG, der mich am Standort Frankfurter Flughafen zusammen mit Herrn Hanno Wiese sowohl mit einem Arbeitsplatz als auch jeder Menge Wissen über das Flugwesen versorgte. Die ganze Abteilung der IL war stets über alle Maßen hilfsbereit und offen für alle Fragen, die es mir als Laien erlaubten, das Feld des Flugwesens vom Aufbau des Flughafens über die Eigenschaften unterschiedlichster Flugzeugtypen bis hin zur detaillierten Zusammensetzung der Flugrouten zu verstehen.

Ein großes Dankeschön gilt auch Katrin Frank und Vera Müllenbach, welche den Kontakt zu Herrn Wendeberg geschaffen haben.

An der Universität Koblenz wurde ich hervorragend von Dominik Grüntjens und Prof. Stefan Müller betreut; stets gab es Hilfe auf alle technischen Fragen, auf keine Antwort per E-Mail musste ich lange warten und sofort war ein Termin eingeschoben, falls es nötig war. Viele der in der Arbeit verwendeten Ideen entstanden erst in den lockeren Gesprächen mit Herrn Grüntjens.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1. Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.2. Existierende Projekte . . . . .	3
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2. Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Astronomie . . . . .	8
2.2. Geodäsie . . . . .	16
2.3. Photovoltaik . . . . .	20
2.4. Photometrie . . . . .	26
2.5. Perzeption . . . . .	36
2.6. Flughafen . . . . .	37
2.7. Flugbetrieb . . . . .	42
2.8. Das Programm <i>CyViation Animator</i> . . . . .	49
<b>3. Umsetzung des Simulations-Programms <i>Fraport Visualisierung &amp; Simulation (FraVIS)</i></b>	<b>51</b>
3.1. Anforderungen an das Programm . . . . .	52
3.2. Aufbau der Software <i>FraVIS</i> . . . . .	54
3.3. Visualisierung . . . . .	56
3.4. Datenerstellung . . . . .	70
3.5. Benutzeroberfläche . . . . .	79
3.6. Konzept für die Umsetzung in <i>CyViation Animator</i> . . . . .	88
<b>4. Ergebnisse und Bewertung</b>	<b>90</b>
4.1. Ergebnis der Anforderungsauswertung . . . . .	90
4.2. Ergebnis der Datenauswertung . . . . .	97
4.3. Ergebnis der Benutzeroberflächenauswertung . . . . .	107
4.4. Fazit & Ausblick . . . . .	107
<b>A. Daten</b>	<b>112</b>
<b>B. Algorithmen</b>	<b>117</b>

# Einheitentabelle

$G_{dif}$	Diffuse Strahlung	$\gamma_s$	Sonnen-Zenitwinkel
$G_{dir}$	Direkte Strahlung	$\alpha_s$	Sonnen-Azimutwinkel
$G_{ref}$	Reflektierte Strahlung	$\alpha_f$	Flächen-Azimutwinkel
$G$	Globale Strahlung	$\sigma_f$	Neigungswinkel
$G_{ex}$	Extraterristrische Strahlung	$\varepsilon$	Einfallswinkel
$G_{ex0}$	Solarkonstante	$\varepsilon'$	Reflexionswinkel
$E_\lambda$	Beleuchtungsstärke	$\varepsilon''$	Brechungswinkel
$E_{ex0}$	Solare Beleuchtungskonstante	$\varepsilon_B$	Brewster-Winkel
$E_{sc}$	Solare Beleuchtungskonstante für die Erdoberfläche	$bi$	Brechungsindex
$E_i$	Beleuchtungsintensität für bestimmte Fläche	$v$	Ausbreitungslichtgeschwindigkeit
$\omega$	Stundenwinkel	$IR$	Reflexionsvermögen
$WOZ$	Wahre Ortszeit	$\lambda_w$	Licht-Wellenlänge
$GZ$	Gesetzliche Zeit	$rc$	Reflexionskoeffizient
$Z_h$	Zeitgleichung	$m$	1 Meter
$AM$	Luftmasse	$ft$	1 Fuss = 0,3048 m
$\delta$	Sonnendeklination	$NM$	1 Nautische Meile = 1.852 m
$\varphi$	Breitengrad	$W$	1 Watt
$\lambda$	Längengrad	$Wp$	1 Watt-Spitze
$\lambda_0$	Median (Greenwich)	$Wh$	1 Watt-Stunde
		$lx$	1 Lux



## Kapitel 1.

---

# Einleitung

Der Flughafen Frankfurt am Main zählt zu den zehn größten Flughäfen der Welt im Bereich des Passagier-Verkehrs; im Jahr 2009 reisten 50.932.840 Passagiere über Frankfurt (vgl. [ACI]). Die Infrastruktur zwischen Menschen, Fahrzeugen, Gepäckbeförderung und Flugzeugen ist hochkomplex organisiert und fein aufeinander abgestimmt. Etwa jede Minute landet eine Maschine. Auch der Energieverbrauch ist enorm; er entspricht dem Verbrauch einer mittleren Stadt, allein pro Stunde belaufen sich die Kosten der Energie für Gebäude und Einrichtungen für die betreibende Firma *Fraport AG* auf 11.000 Euro (vgl. [Ab10]).

In der Zukunft werden Systeme zur Gewinnung erneuerbarer Energie in allen Bereichen des Lebens immer selbstverständlicher, da die Ressourcen knapper werden und erneuerbare Energie geringere Abhängigkeit von öffentlichen Netzen bedeutet. Die populärste Form moderner regenerativer Kraftwerke sind Photovoltaik-Anlagen. Seit Jahren werden sie für den Betrieb von Parkscheinautomaten und zur Entlastung von Privathaushalten verwendet, doch vor allem solarenergetische Großprojekte sind im Vormarsch. Satelliten und Raumstationen nutzen seit Beginn der Raumfahrt Sonnenkollektoren zur Energiegewinnung, in der Sahara befinden sich Projekte in Planung, nach denen neue Solarfelder ganze Staaten mit Energie versorgen können sollen. Die einzigen Voraussetzungen dafür sind Sonnenstrahlung und Sammelfläche. Im Fall eines Flughafens bietet sich diese Form der Energiegewinnung an, sofern sich dieser in einem Gebiet ertragreicher solarer Einstrahlung befindet. Wie dem Diagramm A.1 des *Joint Research Centre* der Europäischen Kommission (vgl. [EC10]) zu entnehmen ist, befindet sich der Standort Frankfurt am Main in einem Gebiet, in welchem Solarenergiegewinnung zu erwägen ist. Gerade das Großangebot verfügbarer Freiflächen am Flughafen macht deren wirtschaftliche Nutzung attraktiv. Doch zuallererst ist der Flughafen ein Verkehrsbetrieb, darum müssen Änderungen der Infrastruktur insbesondere auf deren Auswirkungen auf die Prozesse getestet werden, um einen reibungslosen Verkehrsablauf und die Sicherheit aller Menschen zu gewährleisten.

## 1. Einleitung

### 1.1. Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll getestet und demonstriert werden, inwieweit eine Photovoltaik-Anlage, die auf der Lärmschutzwand verortet werden könnte, sich auf den Betrieb des Frankfurter Flughafens auswirken kann. Die Betrachtung wird hypothetisch betrieben, da dieser Arbeit keine Pläne einer Umsetzung zugrunde liegen. Die Arbeit soll insbesondere Ingenieuren der Planungsabteilungen der *Fraport AG* bei strategischen Simulationen und Demonstrationen zur Hilfe dienen und Situationen veranschaulichen, in denen es in Hinsicht auf eine Gefährdung der Sicht von Piloten und Flugsicherungs-Lotsen zu Blendeffekten kommen kann. Weiterführend ist diese Arbeit dafür ausgelegt, in Zukunft Projekte ähnlichen Schemas ähnlich angehen zu können; dazu zählt zum Beispiel die Simulation stark reflektierender Fassaden von Neubauten, denn der Frankfurter Flughafen befindet sich in einem Prozess ständiger Erweiterung. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt allerdings auf dem Aspekt der visuellen Veranschaulichung spezieller Blendsituationen, verursacht durch Solarmodule im Hinblick auf den Flugbetrieb. Die dafür relevanten Daten werden selbst berechnet oder liegen aus Statistiken und empirischen Studien vor; diese Berechnungen können jedoch nicht alle physisch relevanten Vorgänge aufgreifen, sie setzen auf visuelle Plausibilität aufgrund der nötigsten physikalischen Zusammenhänge und ersetzen nicht die Arbeit eines fachspezifischen Mathematikers oder Ingenieurs.

### 1.2. Existierende Projekte

Da sich die vielen verfügbaren Flächen eines Flughafens zur Nutzung anbieten, gibt es bereits einige nationale und internationale Flughäfen, welche Photovoltaik-Anlagen in unterschiedlicher Dimension installiert haben. So verfügt zum Beispiel der Flughafen Köln/Bonn seit dem 23.03.2009 über eine netzgekoppelte Anlage von 1.685 Solarmodulen, die auf dem Dach des Frachtzentrums verortet sind und eine Spitzenleistung von 295 kWp (Kilowatt-Spitze) umsetzen, im Jahr 265.400 kWh (vgl. [SS10]).



(a) Köln/Bonn (Quelle: [SS10])



(b) München (Quelle: [BP10])

**Abb. 1.1.:** Photovoltaik-Anlagen an Flughäfen

## 1. Einleitung

Auf dem Flughafen München existiert eine Solaranlage sogar schon viel länger: im November 2002 wurde die bis zu diesem Zeitpunkt größte auf einem Flughafen verortete Photovoltaik-Anlage installiert. Die Fläche der Solarmodule beträgt 4.000 m<sup>2</sup> und erzeugt mit einer Spitzenleistung von 457 kWp pro Jahr 450.000 kWh (vgl. [BP10]).

Auf dem Gelände des Stuttgarter Flughafen wurde am 24.08.2009 mit dem Bau einer noch größeren Anlage begonnen: 4.247 monokristalline Solarmodule werden auf dem Dach des Bosch-Parkhauses verortet, um mit einer Fläche von 7.000 m<sup>2</sup> jährlich 870.000 kWh/a umzusetzen (vgl. [RN10]). Auch in Saarbrücken, Zürich und Salzburg befinden sich Photovoltaik-Anlagen auf dem Flughafengelände. Eine der größten Solaranlagen der USA steht seit dem 30.06.2010 auf dem Gelände des Flughafens San José. Dort werden aus 4.680 monokristallinen Modulen 1.713.000 kWh/a Energie umgesetzt (vgl. [PG10]).

Am Flughafen Frankfurt am Main bestehen noch keine Pläne einer ähnlichen Einrichtung. Für den Partner Flughafen Frankfurt Hahn existiert zumindest eine Machbarkeitsstudie, ausgeführt vom *Institut für angewandtes Stoffstrommanagement* des Umwelt-Campus Birkenfeld (vgl. [IfaS04]). Darin werden jedoch ausschließlich, wie auch in allen Artikeln über andere Photovoltaik-Projekte, wirtschaftliche und topografische Aspekte der möglichen Installation eines Solarsystems betrachtet. Die Gefahr der Blendung durch spiegelnde Solarflächen ist zwar bekannt, wird aber in keiner Studie betrachtet. Weder beim Flughafen München<sup>1</sup> noch beim Flughafen Köln/Bonn<sup>2</sup> wurden im Vorfeld wissenschaftliche Betrachtungen der Auswirkung von Blendungen analysiert. Auch beim *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt*<sup>3</sup> (DLR), bei der *Deutschen Flugsicherung*<sup>4</sup> (DFS) und dem *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme*<sup>5</sup> (ISE) gibt es keinerlei Studien über die Auswirkungen von Reflexionen auf Flughäfen im Speziellen, noch auf die Umwelt im Allgemeinen. Nach der Erklärung des ISE ist man auf einem aktuellen Stand der Technik, der es erlaubt 98 % des empfangenen Sonnenlichts direkt zu absorbieren. Tatsächlich gibt es auch keine Meldungen über Störungen der Flugzeuge durch Sonnenpiegelungen in der Presse, obwohl Personen, die mit Laser-Pointern auf Flugzeuge zielen, ein öffentlich diskutiertes Problem darstellen. Doch trotz einer quasi-totalen Absorption lassen sich die Auswirkungen von Blendeffekten in jüngsten Gerichtsurteilen wiederfinden. Das Landgericht Heidelberg verurteilte einen Mann am 15.05.2009 zum Umbau der Photovoltaik-Anlage auf seinem Dach, da die Sonnenreflexionen auf den Modulen für den Nachbarn unerträglich wurden (vgl. A.1). Auch Gerichte in Frankfurt am Main<sup>6</sup> und Würzburg<sup>7</sup> beschäftigten sich bereits mit juristischen Auseinandersetzungen aufgrund von Belästigungen durch Blendeffekte.

Die Visualisierung von Blendungen spielt in den meisten Computerspielen eine große Rolle, da diese unbewusst die Szene realistisch machen. Jeder Blick eines Betrachters in Richtung der Sonne einer virtuellen Welt ist mit der Einschränkung des Blickfeldes

---

<sup>1</sup>Telefongespräch: Hr. Able, Technikabteilung, 29.07.2010

<sup>2</sup>Telefongespräch: Hr. Sarcher, Technikabteilung, 13.07.2010

<sup>3</sup>email: Hr. Andreas Schuetz 05.08.10

<sup>4</sup>email: Hr. Michael Hußmann, 12.08.10; email: Fr. Ute Otterbein, 05.08.10

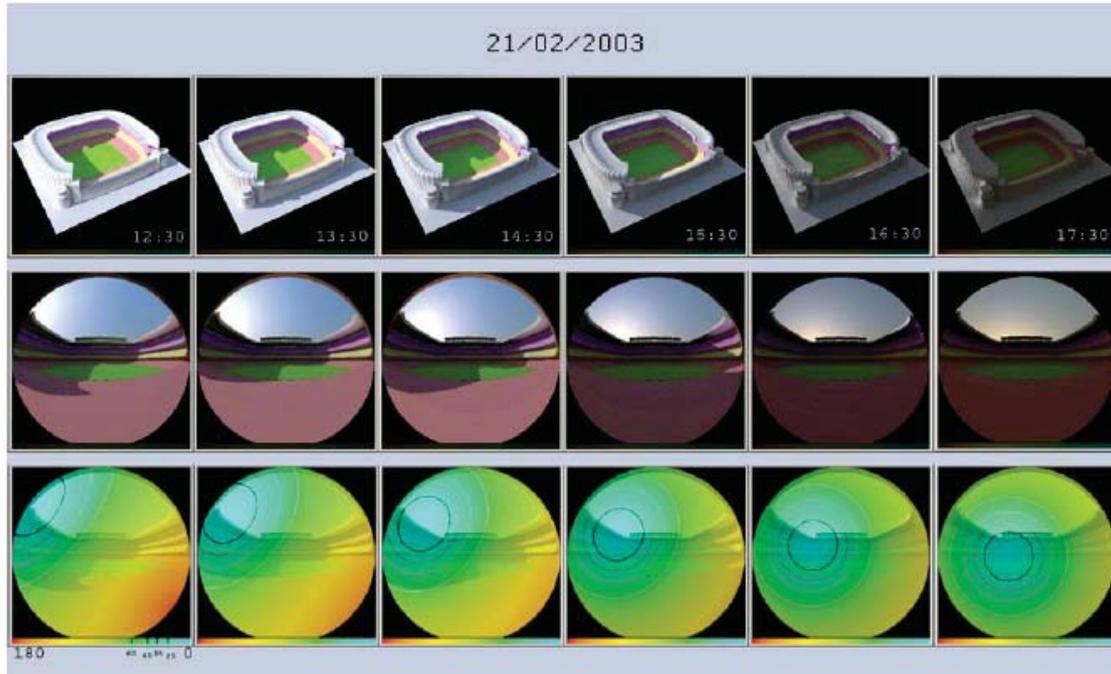
<sup>5</sup>email: Hr. Benedict Blaesi 19.07.10; email: Hr. Christof Wittwer 17.07.10

<sup>6</sup>Urteil Landgericht Frankfurt am Main vom 18.07.08, AZ: 2/12 O 322/06

<sup>7</sup>Urteil Verwaltungsgericht Würzburg vom 31.01.08, AZ: W 5 K 07.1055

## 1. Einleitung

verbunden, was der Realität entspricht. In der Wissenschaft gibt es allerdings nicht viele Studien, die sich mit der Visualisierung der Auswirkung von Blendeffekten beschäftigen. Eine Studie aus Spanien beschäftigt sich mit der Frage, wo sich im neuen Fussball-Stadion des Vereins *Real Madrid* die Präsidenten-Loge zu befinden hat, damit diese so wenig wie möglich der Blendung durch die Sonne ausgeliefert ist. Zusätzlich wird geprüft wie weit ein Sonnenschutz das Stadion bedecken kann ohne das Wachstum des Grases zu beeinträchtigen.



**Abb. 1.2.:** Studie über den Einfluss von Blendeffekten durch die Sonne auf die Präsidenten-Loge des Stadions von Real Madrid (Quelle: [Gom05])

Wie es auch in dieser Arbeit geplant ist wurde für die spanische Studie ein Modell des Stadions entworfen, welches unter verschiedenen Sonnenständen betrachtet wird und die Blenderscheinungen für bestimmte Uhrzeiten geprüft werden kann. Relevant sind in dem Fall vor allem Uhrzeiten, zu denen Fussball-Spiele stattfinden. Im Modell des Stadions wurde zusätzlich eine virtuelle Fischaugen-Kamera eingerichtet, welche das Auftreten von Blendungen durch die Sonne für einen potentiellen Präsidenten in seiner Loge verdeutlicht (vgl. Abb. 1.2, [Gom05]).

Für die amerikanische Stadt Oregon City wurde dagegen eine Studie durchgeführt, ob es durch die Installation einer Photovoltaik-Anlage zu Blendungen der Einwohner kommen kann (vgl. Abb. 1.3):

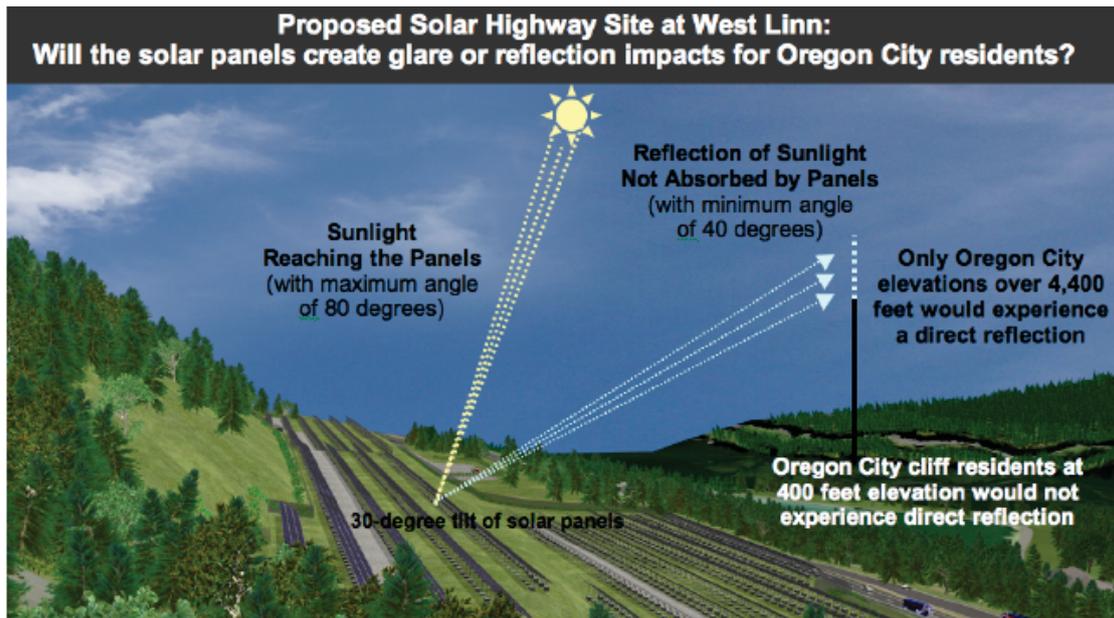


Abb. 1.3.: Studie über den Einfluss von Blendeffekten durch Photovoltaik-Anlagen auf die Einwohner von Oregon City, USA (Quelle: [GC])

### 1.3. Aufbau der Arbeit

Die Dokumentation dieser Arbeit besteht aus drei Punkten: in den *Grundlagen* werden die Zusammenhänge der Physik, Astronomie, Geodäsie, Photovoltaik, Photometrie, Radiometrie und anthropologischer Perzeption geklärt und der Aufbau des Flughafens sowie der Ablauf des Flugbetriebs vorgestellt. Diese Felder sind die grundsätzliche Voraussetzung für den Punkt der *Umsetzung* der Arbeit in Form eines selbsterstellten Programms namens *FraVIS*, in welchem alle vorher beschriebenen Zusammenhänge in ein Modell übertragen werden. Die Umsetzung ist der zweite Schwerpunkt der Dokumentation und unterteilt sich wiederum in drei Teile: die Umsetzung der *Visualisierung* der Szene, die *Datenerstellung*, welche die Voraussetzung für die *Visualisierung* bildet, sowie der Generierung einer *Benutzeroberfläche* zur Steuerung aller implementierten Optionen. In den Unterkapiteln *Visualisierung* und *Datenerstellung* werden alle Bereiche der *Grundlagen* verwendet.

Im letzten Kapitel werden die *Ergebnisse* dieser Arbeit dargestellt. Hierfür werden die Resultate der *Visualisierung* und der *Datenerstellung* vorgestellt.