



Schätzung der natürlichen Beleuchtungssituation anhand von Außenaufnahmen für Anwendungen der Erweiterten Realität

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B. Sc.)

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT II
INSTITUT FÜR INFORMATIK

eingereicht von: Katja Wolff
geboren am: 14. Juli 1990
in: Neustrelitz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eisert
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reulke

eingereicht am:

verteidigt am:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Verwandte Arbeiten und verwendete Theorien	6
2.1	Position der Sonne	6
2.2	Das Himmelsmodell von Perez	7
2.3	Repräsentation der natürlichen Beleuchtungssituation	10
3	Segmentierung des Himmels	14
3.1	Funktionsweise	14
3.2	Evaluierung	20
4	Schätzung der Beleuchtung durch die Sonne	23
4.1	Merkmale des Himmels	24
4.2	Merkmale des Vordergrundes	25
4.3	Schätzung der Sonnensichtbarkeit v_s	27
5	Korrektur der Sonnenposition	28
5.1	Entfernung der Eckenabschattung	29
5.2	Verwendung des Himmelsmodells von Perez	29
5.3	Betrachtung der Schattenrichtung	33
5.4	Auswahl des bestmöglichen Azimutwinkels ϕ_c	35
6	Ergebnisse	37
A	Anhang	41
A.1	Quellcode von der CD starten	41
A.2	Übersicht über enthaltenes Bildmaterial	42
	Literaturverzeichnis	44

1 Einleitung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie aus einer einzelnen Außenaufnahme die natürliche Beleuchtungssituation geschätzt werden kann. Im Besonderen sollen hierbei von der Kamera zur Verfügung gestellte Parameter zu Hilfe genommen werden, wie etwa GPS-Koordinaten und Neigungswinkel. Da letztere nicht immer akkurat sind, sollen außerdem Informationen aus dem Erscheinungsbild des Himmels und der Schattenrichtung im Bild in die Schätzung der Beleuchtung mit eingehen.

Heutzutage wird das Einbetten von 3D-Objekten in reale Videoaufnahmen für verschiedene Anwendungen genutzt, unter anderem auch auf mobilen Geräten wie Smartphones oder Tablets. So bedienen sich zum Beispiel Spiele im Bereich der erweiterten Realität dieser Methode, aber auch interaktive Stadtführer und Point-of-Sale Kiosksysteme.

Soll ein virtuelles 3D-Objekt in ein Bild oder Video im Rahmen der erweiterten Realität eingefügt werden, so ist meist der Unterschied zwischen virtuellem Objekt und realer Umgebung ohne Anpassung der Beleuchtung deutlich zu erkennen. Stattdessen ist es aber oft erwünscht, dass sich virtuelle Objekte nahtlos in das Bild der realen Szene einfügen und der Nutzer solcher Anwendungen diese Unterschiede nicht bewusst wahrnimmt. Wird nun die Beleuchtungssituation aus dem Bild geschätzt und auf das virtuelle Objekt angewandt, so reduziert sich dieser wahrgenommene Unterschied deutlich, eventuell verschwindet er sogar gänzlich.

Die Beleuchtungssituation I lässt sich dabei durch drei Parameter repräsentieren, $I = \{\Delta\theta_s, \Delta\phi_s, v_s\}$, wobei $\Delta\theta_s$ der relative Zenitwinkel der Sonne zur Kamera und $\Delta\phi_s$ der relative Azimutwinkel der Sonne zur Kamera ist. $v_s \in \{0, 1\}$ repräsentiert die Sichtbarkeit der Sonne, das heißt, ob die Sonne von Wolken verdeckt ist oder die Szene direkt beleuchtet wird.

Zusätzlich soll die Beleuchtung der Szene mithilfe einer Environment Map dargestellt werden, da diese oft für die Beleuchtung von 3D-Objekten verwendet werden. Sie enthält Informationen über den Lichteinfall aus allen Richtungen. Da bei natürlicher Beleuchtung der Himmel als einzige, flächige Lichtquel-

le angesehen werden kann, ist die Environment Map auch eine Darstellung der Himmelskuppel, welche über den im Bild sichtbaren Ausschnitt hinaus extrapoliert wird.

Zur Analyse der Beleuchtungssituation I sollen neben der Aufnahme auch zusätzliche Informationen verwendet werden, welche von Sensoren in der Kamera bereitgestellt werden. Die meisten modernen mobilen Geräte, wie etwa Smartphones, sind heutzutage mit einem GPS-System, einem Kompass und Sensoren zur Messung von Neigungswinkeln ausgestattet. Konkret sollen folgende Parameter für die Schätzung der Beleuchtung verwendet werden:

θ_c der Zenitwinkel der Kamera, ermittelt über die Neigung des Gerätes
 ϕ_c der Azimutwinkel der Kamera, ermittelt durch einen Kompass
 f die Brennweite der Kamera in Pixeln

λ der Längengrad, an dem das Bild aufgenommen wurde und
 ϕ der Breitengrad, ermittelt durch das GPS-System
 h die Höhe über dem Meeresspiegel, ermittelt durch das GPS-System
 y das Jahr der Aufnahme des Bildes
 m der Monat
 d der Tag
 t die Uhrzeit in Stunden, Minuten und Sekunden
 tz die Abweichung von der koordinierten Weltzeit (Zeitzone)

Aus Datum, Uhrzeit, den GPS-Koordinaten und der Zeitzone (dem zweiten Block der Parameterliste) lässt sich der aktuelle Sonnenstand bestimmen. [6] Zusammen mit der Blickrichtung der Kamera kann man daraus nun die relative Position $(\Delta\theta_s, \Delta\phi_s)$ der Sonne zur Kamera errechnen, welche durch Verfahren der Bildverarbeitung überprüft und verbessert werden soll, indem zum Beispiel ein ungenau gemessener Winkel ϕ_c anhand des fotografierten Himmels überprüft wird.

Die Beleuchtung einer Szene unter freiem Himmel hängt zu einem großen Teil vom Erscheinungsbild des Himmels ab: ist es klar oder diesig, morgens oder abends, sonnig oder verhangen. Daher ist es zunächst hilfreich, den Himmel zu

segmentieren, um ihn zu analysieren. In Kapitel 3 soll betrachtet werden, wie dies mithilfe von Schwellwertbildung, Betrachtung der Blautöne im Bild und einem Region-Growing-Algorithmus bewerkstelligt werden kann. Der Bereich, der hierbei nicht als Himmel identifiziert wird, soll in dieser Arbeit stets als Vordergrund bezeichnet werden.

Auch um die Sichtbarkeit der Sonne v_s bestimmen zu können, muss das Erscheinungsbild des Himmels beobachtet werden. Dazu sollen in Kapitel 4 verschiedene Hinweise aus dem Bild untersucht werden: die Farbsättigung des Himmels zur Bestimmung der Wolkendecke und der Unterschied der Intensität zwischen den hellen und dunklen Regionen, der Kontrastwert und die Farbsättigung des Vordergrundes. Wird bei der Betrachtung des Himmels bereits festgestellt, dass er verhangen ist, so ist klar, dass die Sonne nicht sichtbar ist. Darüber hinaus soll beschrieben werden, wie die genannten Hinweise aus dem Vordergrund kombiniert werden können, um in schwieriger zu entscheidenden Fällen die Sichtbarkeit der Sonne v_s zu bestimmen.

Oft ist der verbaute Kompass in Smartphones und anderen mobilen Geräten sehr ungenau und lässt sich durch elektromagnetische Felder in der Nähe des Gerätes ablenken. Um solche Fälle zu erkennen und die aus den Parametern errechnete Position der Sonne zu korrigieren, soll zusätzlich der Gradient des wolkenlosen Teils des Himmels und die Schattenrichtung betrachtet werden. Dies ist nur möglich und sinnvoll, wenn bereits festgestellt wurde, dass die Sonne die Szene direkt beleuchtet und der Himmel nicht zugezogen ist. Konkret soll das Himmelsmodell von Perez [5] verwendet werden um die Position der Sonne aus dem im Foto erkennbaren Himmel zu schätzen. Dabei wird es auf den sichtbaren Himmel im Bild gefittet. Dieses Verfahren allein ist oft ungenau und es bietet sich an, wenigstens zwei wahrscheinlichste Sonnenrichtungen zu betrachten. Aus beiden wird nun jene ausgewählt, die am ehesten der Schattenrichtung im Bild entspricht. Die gefundene Position der Sonne wird abschließend mit der aus den Parametern errechneten Position verglichen.

Es gibt bereits Verfahren, die aus einer einzigen Außenaufnahme, ohne Bereitstellung von zusätzlichen Parametern, die Position der Sonne und deren Sichtbarkeit schätzen. [1] Diese benutzen für verschiedene Zwecke maschinelles Lernen, zum Beispiel zur Erkennung des Himmels, der Schatten, der Gebäudfassaden oder der Sichtbarkeit der Sonne. Da maschinelles Lernen große Mengen an Trainingsdaten benötigt, soll in dieser Arbeit untersucht werden, wie ohne es die Beleuchtungssituation geschätzt werden kann.

Für diese Arbeit wurde ein Smartphone vom Typ Samsung GT-i9001 verwendet. Die Brennweite in Millimetern beträgt für dieses Gerät 3,8. Der Bildsensor hat eine Größe von $3,93 \times 2,95 \text{ mm}$. Aus den beiden Werten lässt sich die Brennweite in rund 1546 Pixel umrechnen. Alle anderen Parameter können zusammen mit den Aufnahmen aufgezeichnet werden.

Für die Implementierung der in dieser Arbeit beschriebenen Algorithmen wurde MATLAB verwendet.

2 Verwandte Arbeiten und verwendete Theorien

In diesem Kapitel soll ein Überblick über verwandte Arbeiten gegeben werden, welche sich mit dem Erkennen von Beleuchtungssituationen beschäftigen und für diese Arbeit relevant sind. Außerdem sollen dort beschriebene Ansätze und Algorithmen, die hier verwendet werden, zusammenfassend dargestellt werden.

In [1] wird aus einer einzelnen Außenaufnahme die natürliche Beleuchtung geschätzt. Dabei wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Sonnenposition und -sichtbarkeit aus verschiedenen schwachen Hinweisen errechnet, welche aus dem Himmel, den vertikalen Flächen und dem Boden gewonnen werden. Aus diesen schwachen Hinweisen allein kann die Beleuchtung nicht verlässlich geschätzt werden. Sie können aber kombiniert werden und ergeben so eine sehr viel robustere Schätzung.

In dieser Arbeit soll ähnlich vorgegangen werden, wenn auch ohne die Verwendung von maschinellem Lernen. Durch die Verwendung von den gemessenen Parametern viele Informationen schon in ausreichender Genauigkeit vor und müssen nicht mehr aus dem Bild geschätzt werden. Nur der Azimutwinkel der Kamera und die Sonnensichtbarkeit sollen wie in [1] durch die Betrachtung verschiedener Hinweise aus dem Bild ermittelt werden.

2.1 Position der Sonne

Um die aktuelle Position der Sonne am Himmel aus den Kameraparametern zu errechnen, können Längengrad, Breitengrad und die Höhe über dem Meeresspiegel, sowie das Datum, die exakte Uhrzeit und die Angabe der Zeitzone verwendet werden. In dieser Arbeit wurde dafür der in [6] beschriebene Algorithmus genutzt.

Dabei wird die Position der Sonne S hier in sphärischen Koordinaten $S = (\theta_s, \phi_s)$ angegeben, wobei θ_s der Zenitwinkel der Sonne und ϕ_s der Azimutwinkel der Sonne relativ zur Nordrichtung ist.

2.2 Das Himmelsmodell von Perez

Eine Möglichkeit, die Position der Sonne aus dem Bild allein zu schätzen, besteht darin, den Farbverlauf des Himmels genauer zu betrachten. Dies setzt voraus, dass dieser klar ist und keine Wolken auftreten und eine genügend große Himmelsfläche im Bild zu sehen ist. Dazu soll das physikalisch basierte Himmelsmodell von Perez [5] verwendet werden.

In [3] wird dieses Modell genutzt, um aus einer Serie von Außenaufnahmen, zum Beispiel von unbewegten Webcams, Informationen über die Kamera zu errechnen. Dabei wurden die Veränderungen des Himmels desselben Himmelsausschnittes über einen längeren Zeitraum beobachtet. Errechnet wurden unter anderem die Brennweite f_c , der Azimutwinkel ϕ_c und der Zenitwinkel θ_c der Kamera. Dafür wird das Modell von Perez in eine vereinfachte Form gebracht um dann als Funktion von diesen Kameraparametern dargestellt zu werden.

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die Brennweite f_c und der Zenitwinkel θ_c bereits hinreichend genau vorliegen, um die Beleuchtungssituation zu schätzen. Im folgenden Abschnitt soll die in [3] beschriebene Anwendung des Himmelsmodells von Perez auf den sichtbaren Himmel wiedergegeben werden, allerdings nur noch zu dem Zweck, den Winkel ϕ_c zu bestimmen.

Das Perez Sky Model beschreibt die Luminanz eines beliebigen Elementes des Himmels als eine Funktion seiner Höhe und seiner relativen Position zur Sonne. Siehe hierzu Abbildung 1.

Die *relative* Luminanz l_p eines Elementes des Himmels ist eine Funktion seines Zenitwinkels θ_p und des Winkels γ_p , den er mit der Sonne bildet:

$$l_p = f(\theta_p, \gamma_p) = [1 + a \exp(b/\cos \theta_p)] \times [1 + c \exp(d\gamma_p) + e \cos^2 \gamma_p]. \quad (1)$$

Dabei spezifizieren die fünf Konstanten a , b , c , d und e die aktuelle Beschaffenheit der Atmosphäre. Diese fünf Konstanten können durch eine lineare

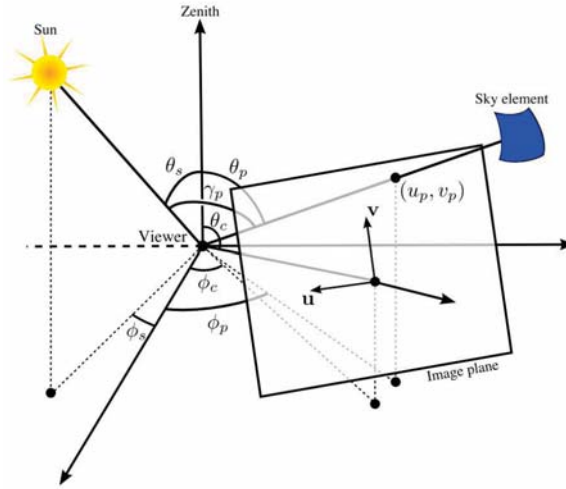


Abbildung 1: Geometrie des Problems, wenn die Kamera ein Element des Himmels aufnimmt (blauer Bereich). Das Himmelselement entspricht dem Pixel (u_p, v_p) im Bild. Die Kamera ist um den Winkel (θ_c, ϕ_c) gedreht. Die Brennweite f_c ist die Entfernung zwischen Ursprung und Bildzentrum. Die Sonnenposition ist gegeben durch (θ_s, ϕ_s) und der Winkel zwischen der Sonne und dem Himmelselement ist γ_p . Entnommen aus [3]

Funktion angenähert werden, die nur von einem Parameter abhängt: der Lufttrübung t . Anschaulich ausgedrückt beschreibt t die Stärke der Lichtstreuung in der Atmosphäre. Je kleiner also t ist, desto klarer ist der Himmel. Einem klaren Himmel entspricht in etwa ein Wert von $t = 2,17$, welcher die Werte $a = -1$, $b = -0.32$, $c = 10$, $d = -3$ und $e = 0.45$ repräsentiert. Siehe hierzu [8]. Der Vorteil besteht darin, im Folgenden nur noch mit einer Unbekannten t anstatt mit 5 Unbekannten zu arbeiten.

Das Modell von Perez beschreibt die *absolute* Luminanz L_p eines Elementes des Himmels als eine Funktion eines anderen, beliebigen Elementes. Wenn zum Beispiel die Zenitluminanz L_z bekannt ist, so lässt sich die Luminanz anderer Himmelselemente ausdrücken als:

$$L_p = L_z \frac{f(\theta_p, \gamma_p)}{f(0, \theta_s)}, \quad (2)$$

wobei θ_s der Zenitwinkel der Sonne ist. Diese Luminanz L_p soll am Ende für

jeden Himmelspixel in der Aufnahme berechnet und dann mit der Luminanz des fotografierten Himmels verglichen werden.

Wenn nun eine Kamera wie in Abbildung 1 den Himmel aufnimmt, so sind θ_p und γ_p Unbekannte und müssen zur Berechnung des Perez Himmelsmodells mithilfe von Kameraparametern dargestellt werden. Es ergibt sich:

$$\theta_p = \arccos\left(\frac{v_p \sin\theta_c + f_c \cos\theta_c}{\sqrt{f_c^2 + u_p^2 + v_p^2}}\right), \quad (3)$$

$$\gamma_p = \arccos(\cos\theta_s \cos\theta_p + \sin\theta_s \sin\theta_p \cos(\phi_p - \phi_s)). \quad (4)$$

In letzterer Gleichung ist eine weitere verbleibende Unbekannte ϕ_p enthalten, welche wie folgt berechnet werden kann:

$$\phi_p = \arctan\left(\frac{f_c \sin\phi_c \sin\theta_c - u_p \cos\phi_c - v_p \sin\phi_c \cos\theta_c}{f_c \cos\phi_c \sin\theta_c + u_p \sin\phi_c - v_p \cos\phi_c \cos\theta_c}\right) \quad (5)$$

In [3] sind die vollständigen Rechnungen zur Aufstellung obiger drei Formeln aufgeführt. Würde man nun (3), (4) und (5) in (1) ersetzen, so erhielte man die endgültige Formel zur Berechnung der relativen Luminanz, welche von den bekannten Parametern (u_p, v_p) (der Position des Himmelspixels im Bild), θ_c (dem Zenitwinkel der Sonne), f_c (der Brennweite) und (θ_s, ϕ_s) (der Position der Sonne) und zusätzlich von der zu ermittelnden Variablen ϕ_c abhängt:

$$l_p = g(u_p, v_p, \theta_c, \phi_c, f_c, \theta_s, \phi_s) \quad (6)$$

Bevor diese Formel nun genutzt werden kann, um ϕ_s zu ermitteln, muss die *relative Luminanz* l_p noch ins Verhältnis zu einem Referenzelement des Himmels gesetzt werden, um die *absolute Luminanz* zu erhalten. In (2) wird hierzu die Zenitluminanz L_z verwendet. Da der Zenit des Himmels in den meisten Bildern nicht sichtbar ist, soll L_z als eine weitere Unbekannte gelten. Da der Nenner in Gleichung 2 nicht von ϕ_c abhängt, kann er mit z zu einer einzigen Unbekannten $k = L_z/f(0, \theta_s)$ kombiniert werden.

Nachdem nun ein physikalisch basiertes Modell eines klaren Himmels vorliegt, welches als Funktion von Kameraparametern ausgedrückt werden kann,

soll dieses verwendet werden, um im Vergleich mit dem fotografierten Himmel den Azimutwinkel der Kamera ϕ_c zu rekonstruieren. Wenn nun ein Bild vorliegt, in dem der Himmel sichtbar ist, sei \mathcal{P} die gegebene Menge der Himmelspixel. Nun soll ein ϕ_c gefunden werden, welches folgenden Ausdruck minimiert:

$$\min_{\phi_c} \sum_{p \in \mathcal{P}} (y_p - k g(u_p, v_p, \theta_c, \phi_c, f_c, \theta_s, \phi_s))^2 \quad (7)$$

Hierbei ist y_p die beobachtete Luminanz des Pixels p im Originalbild. Weil diese Gleichung nicht-linear ist, hat es sich ergeben, dass folgender Ansatz gute Ergebnisse liefert: Der Variablen ϕ_c werden gleichmäßig über dem Intervall $[0, 2\pi]$ Werte zugeordnet. Diese Werte werden in die Summe in Gleichung (7) eingesetzt und letztendlich der Wert für ϕ_c behalten, der die Summe minimiert. Dadurch kann das tatsächliche Minimum gut angenähert werden.

Dieses Verfahren wird in Kapitel 5 verwendet.

2.3 Repräsentation der natürlichen Beleuchtungssituation

Da das Verständnis von natürlicher Beleuchtung in vielen Anwendungsgebieten, wie etwa Computer Grafik, aber auch in anderen Gebieten, wie z.B. der Solarenergie, eine große Rolle spielt, wurden verschiedenste Repräsentationen der natürlichen Beleuchtung entwickelt, zum Beispiel physikalisch basierte Modelle oder statistische Repräsentationen. Siehe dazu [2] S. 11 ff. In diesem Abschnitt sollen die in dieser Arbeit verwendeten Repräsentationen vorgestellt werden.

Intuitive Repräsentation nach Lalonde

Zum einen soll, wie bereits in der Einleitung angedeutet wurde, die Beleuchtungssituation I durch drei Parameter repräsentiert werden: $I = \{\Delta\theta_x, \Delta\phi_s, v_s\}$, welche in [2] beschrieben werden.

Bei dieser Repräsentation wird der Himmel und die Sonne separat modelliert. Im Unterschied zu anderen Ansätzen, wie etwa der physikalisch basierten Modellierung, ist dieses Modell einfacher und intuitiver, was es geeigneter für

die Anwendung auf ein einziges Foto macht. Die Sonne wird modelliert durch:

v_s repräsentiert die Sichtbarkeit der Sonne, d.h. ob sie direkt auf die Szene scheint oder verdeckt ist.

$S = (\Delta\theta_x, \Delta\phi_s)$ ist die Winkelposition der Sonne, relativ zur Blickrichtung der Kamera, in sphärischen Koordinaten. Hierbei ist $\Delta\theta_s = \theta_s - \theta_c$ der relative Zenitwinkel und $\Delta\phi_s = \phi_s - \phi_c$ der relative Azimutwinkel der Sonne. Die s - und c -Indizes stehen für die Sonne bzw. die Kamera.

Ist $v_s = 0$, so beleuchtet die Sonne nicht direkt die Szene, weil der Himmel zum Beispiel bewölkt ist, und ihre Position kann nicht aus dem Erscheinungsbild des Himmels abgeleitet werden. In diesem Fall ist dies auch gar nicht nötig, da die Objekte der Szene alle durch die gleiche flächige Lichtquelle - den Himmel - beleuchtet werden. Ist stattdessen $v_s = 1$, so ist es wichtig die Position der Sonne abzuleiten, da sie verantwortlich ist für Schattenwurf, Glanzlichter und andere Effekte, welche das Aussehen der Szene stark beeinflussen.

Der Himmel wird dargestellt durch das zuvor beschriebene Himmelsmodell von Perez. Der Vorteil dieses Modells ist, dass nur zwei Parameter geschätzt werden müssen, nämlich der Lufttrübungsfaktor t und die Zenitluminanz L_z . Das kann anhand des im Bild sichtbaren Ausschnittes des Himmels geschehen, auch wenn dieser zu einem Teil bewölkt ist. Sobald beide bekannt sind, kann das Erscheinungsbild des Himmels auch außerhalb des Bildausschnittes extrapoliert werden. Der so modellierte Himmel kann benutzt werden, um die Wolken aus dem Bild zu extrahieren und eine reiche Beschreibung der natürlichen Beleuchtungssituation zu erhalten. Zusammengefasst wird der Himmel beschrieben durch folgende zusätzliche Variablen:

t der Lufttrübungsfaktor, L_z die Zenitluminanz und C die Wolkendecke, welche den Unterschied zwischen dem beobachteten und dem vorhergesagten Himmel nach Perez darstellt.

Die Himmelskomponente kann natürlich nur dargestellt werden, wenn der Himmel im Bild sichtbar ist.

Environment Map

Eine weitere Möglichkeit, die Beleuchtungssituation darzustellen, besteht in der Verwendung einer sogenannten Environment Map. [2] Diese basiert normalerweise auf der akkuraten Messung und direkten Speicherung des Betrages des einfallenden Lichtes aus jeder Richtung am Ort der aufgenommenen Szene. Im Gegensatz zu physikalisch basierten Modellen, wie dem Modell von Perez, wird hier keine kompakte Formel benutzt, sondern sämtliche Informationen über das Licht sind explizit gespeichert.

Da der Ort der im Bild festgehaltenen Szene nach der Aufnahme nicht noch einmal zur selben Zeit besucht werden kann um Messungen anzustellen, lässt sich diese Repräsentation nicht für bereits aufgenommene Fotos anwenden. Allerdings kann die zuvor beschriebene Repräsentation der Beleuchtung in eine solche Environment Map umgewandelt und gespeichert werden. Dies hat den Vorteil, dass die geschätzte Beleuchtungssituation anschaulich dargestellt werden kann. Environment Maps sind eine oft angewandte Methode, um 3D-Objekte zu beleuchten.



Abbildung 2: Originalaufnahme und zugehörige Environment Map, welche aus dem zuvor berechneten Himmelsmodell von Perez erstellt wurde. Sie ist nach Norden ausgerichtet. Die blaue Linie zeigt die Blickrichtung der Kamera an. Der im Bild sichtbare Himmel wurde entsprechend übernommen.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Theorien und Methoden sollen nun im Folgenden verwendet werden, um die Beleuchtungssituation aus einer einzelnen Aufnahme zu schätzen und darzustellen.

3 Segmentierung des Himmels

Ob der Himmel in einem Foto bedeckt, nur mit einzelnen Wolken durchzogen oder sehr klar ist, hat eine große Einwirkung auf die Beleuchtungssituation im Bild. Für eine gute Schätzung der Sichtbarkeit der Sonne ist es sinnvoll die Beschaffenheit des Himmels zu analysieren. Daher ist es notwendig, den Himmel samt Wolken zunächst möglichst genau zu segmentieren.

In diesem Kapitel soll der verwendete Algorithmus vorgestellt werden. Außerdem werden die Ergebnisse der Himmelssegmentierung durch den Algorithmus im zweiten Abschnitt mit Bildern verglichen, auf denen der Himmel von Hand maskiert wurde.

3.1 Funktionsweise

Nach der Segmentierung des Himmels soll ein Binärbild bereitgestellt werden, in welchem Pixel des Himmels mit 1 und Pixel des Vordergrundes mit 0 markiert sind. Dazu soll in vier Schritten vorgegangen werden, was die Menge der Himmelspixel kontinuierlich einschränkt bzw. immer mehr Pixel dem Vordergrund zuordnet. Zunächst werden dunkle Bereiche des Bildes mit einem Schwellwert gefunden und als Vordergrund eingestuft. Danach wird über den Farb- und Sättigungswert der Pixel festgestellt, ob sie Teil des Himmels sein können. Pixel unterhalb der Horizontlinie werden dem Vordergrund zugeordnet. Auf den verbliebenen Pixeln wird letztendlich mithilfe von *Region Growing* ein homogener, zusammenhängender Bereich gesucht. Dieser stellt den segmentierten Himmel dar. In Abbildung 3 sind diese Schritte (bis auf das Markieren von Pixeln unterhalb der Horizontlinie) an einem Beispiel dargestellt.

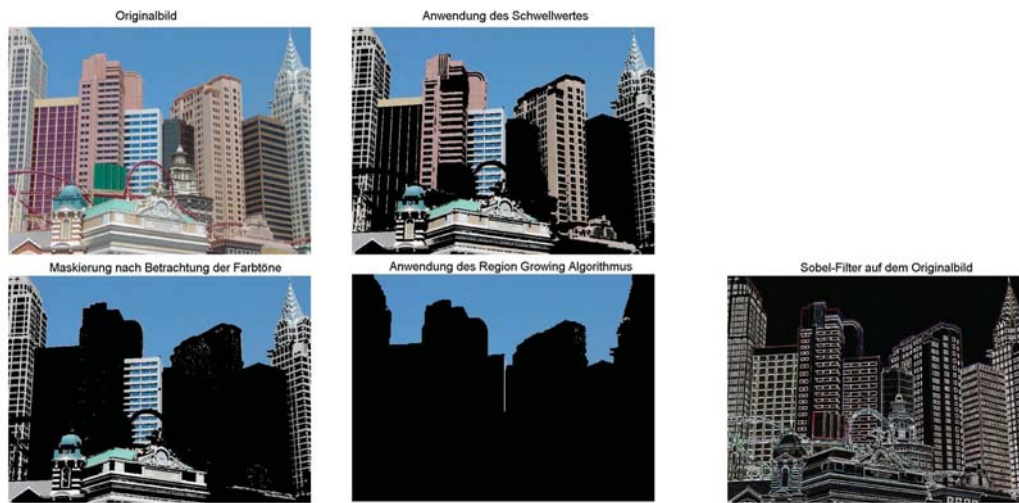


Abbildung 3: Dargestellt sind die Schritte der Himmelssegmentierung. Schwarze Pixel markieren den gefundenen Vordergrund. Oben links: das Originalbild. Oben rechts: Markierter Vordergrund nach Anwendung eines Schwellwertes. Unten links: Nur blaue Farbtöne werden nicht als Vordergrund markiert. Unten Mitte: Segmentierter Himmel nach Anwendung des Region Growing Algorithmus. Unten rechts: Anwendung des Sobel-Operators auf das Originalbild, um darauf den Region Growing Algorithmus anzuwenden.

Schwellwert

Zunächst soll ausgenutzt werden, dass bei Tageslicht der Himmel fast immer eines der hellsten Objekte im Bild ist. Dies ermöglicht ein Segmentieren mithilfe eines Schwellwertes. Dunkle Bereiche, wie zum Beispiel Vegetation, dunkle Gebäudefassaden und Ähnliches können damit bereits als Vordergrund markiert werden.

Da der Blauanteil im Himmel sehr hoch ist, wird nur das Graustufenbild betrachtet, welches sich aus dem Blaukanal des Bildes ergibt. Der Vorteil ist, dass zum einen auch tiefblaue Himmel im Graustufenbild hell erscheinen. Zum anderen ist der Blauanteil im Weiß hoch, weshalb sich die Helligkeit von Wolken und Himmel im Blaukanal am wenigsten unterscheidet. Somit wird auch sichergestellt, dass zum Beispiel auch dunkle, blaue Himmel vor hellen, weißen Gebäuden nicht als Vordergrund markiert werden. In Abbildung 4 kann man

gut erkennen, dass sich der Himmel im Blaukanal am besten vom Vordergrund abhebt und sich Wolken dagegen am wenigsten vom Himmel unterscheiden.



Abbildung 4: Die verschiedenen Kanäle eines Bildes im RGB-Farbraum.

MATLAB stellt nun bereits die Methode `graythresh(I)` zur Verfügung, welche für ein Bild `I` nach dem Verfahren von Otsu einen Schwellwert ermittelt. Berechnet man diesen allerdings bereits für den ungefilterten Blaukanal, ergibt sich die Maske in Abbildung 5. In dieser wurden noch viele Pixel des Vordergrundes weiß als Himmel markiert. Vor allem kann man erkennen, dass der schwarze, als Vordergrund markierte Bereich unzusammenhängend ist und viele Löcher aufweist.



Abbildung 5: Anwendung des Schwellwertes auf den ungefilterten Blaukanal des Bildes

Wendet man nun ein Verfahren an, das sich *Öffnen durch Rekonstruktion* nennt, lassen sich diese hellen Bildpunkte im Vordergrund unterdrücken. In MATLAB stehen dafür die Funktionen `imerode()` und `imreconstruct()` zur Verfügung. Hier soll ein Kreis als strukturierendes Element dienen. In Abbildung 6 wird die Anwendung dieser Funktionen und die nachfolgend erzeugte

Maske mithilfe des Schwellwertes dargestellt. Man sieht leicht, dass dadurch sehr viel weniger Pixel des Vordergrundes falsch als Himmel markiert werden.



Abbildung 6: Anwendung von Filtern vor der Berechnung des Schwellwertes

Um nun auch auszuschließen, dass kleinere oder schmale Objekte wie Äste am Rand von Himmel und Vordergrund als Himmel gekennzeichnet werden, wird das entstandene Binärbild noch einmal erodiert. Man erhält eine Maske wie in Abbildung 7.



Abbildung 7: Erodierte Maske

Das Anwenden eines Schwellwertes allein erzeugt schon gute Ergebnisse in Bildern, welche viel Vegetation und andere dunkle Bereiche enthalten, wie in den hier verwendeten Bildern. Schwierigkeiten tauchen allerdings bei zum Beispiel hellen Gebäuden oder in Aufnahmen eines dunklen Himmels vor einer reflektierenden Oberfläche wie zum Beispiel Wasser auf. (Zu erkennen in Abbildung 3.) Es bietet aber eine gute Grundlage für nachfolgende Verfahren zur Himmelssegmentierung.

Blautöne

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, alle Pixel als Vordergrund zu kennzeichnen, welche nicht blau sind. Tagsüber nimmt der Himmel fast immer einen weiß-gräulichen bis tiefblauen Farbton an. Nur kurz nach Sonnenauf- bzw. vor Sonnenuntergang treten auch andere Farbtöne wie gelb, rot und lila auf.

Dazu wird das Bild zunächst vom RGB-Farbraum in den HSV-Farbraum transformiert, welcher eine Farbe mit Hilfe des Farbwertes, der Farbsättigung und des Hellwertes bzw. der Dunkelstufe definiert. Das erlaubt es, Farben anhand ihres Farbwertes einfach zu kategorisieren. Dieser wird im HSV-Farbraum als Winkel H auf dem Farbkreis angegeben. Der Bereich von 160° bis 260° deckt dabei großzügig die Blautöne ab.

Sehr helle und als weiß empfundene Bereiche im Bild können allerdings eine Vielzahl anderer Farbtöne H aufweisen, welche nicht bewusst wahrgenommen werden. Deswegen wird zusätzlich über den S-Kanal gesichert, dass nur Pixel als Vordergrund maskiert werden, welche auch eine minimale Farbsättigung von 10% aufweisen.

Horizontlinie

Da aus den Kameraparametern auch die Horizonthöhe im Bild in Pixeln berechnet werden kann, bietet es sich an, alle darunterliegenden Pixel als Vordergrund zu maskieren. Vor allem helle Untergründe, welche durch vorhergehende Methoden noch nicht als Vordergrund erkannt wurden, können somit vom Himmel unterschieden werden. Es wird angenommen, dass der Horizont parallel zu den waagerechten Bildkanten verläuft.

Aber auch wenn die Horizontlinie nicht bekannt ist oder zu tief liegt, aufgrund ungenau gemessener Kippwinkel, kann ein Horizont geschätzt werden. Dafür wird die höchstliegende Zeile im Bild gesucht, in der mit den vorhergehenden Methoden bereits weniger als 5% der Pixel als Himmel markiert worden sind. Diese Zeile wird als Horizont angenommen und tieferliegende Pixel werden als Vordergrund markiert. Diese Methode ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Das Auffinden des Horizontes im Bild kann viele helle Bereiche am Boden als Vordergrund maskieren.

Region Growing

In Abbildung 3 kann man am ersten Bild in der zweiten Zeile erkennen, dass nach Anwendung der zuvor beschriebenen Methoden noch viele Pixel falsch als Himmel markiert werden, obwohl sich die hellen Häuser bei Betrachtung deutlich vom Himmel abheben. Dies lässt sich beheben, indem ausgenutzt wird, dass zwischen Vordergrund und Himmel oft Kanten auftreten, welche durch den Sobel-Operator detektiert werden können. Es entsteht ein Bild wie in Abbildung 3 rechts unten zu sehen ist. Darauf kann mithilfe des Region-Growing-Algorithmus der Himmel als zusammenhängende Region gefunden werden.

Dabei werden drei initiale Pixel verwendet. Diese werden gleichmäßig auf den noch nicht als Vordergrund markierten Pixeln der ersten Zeile des Bildes verteilt, da der Himmel in fast allen Aufnahmen immer an den oberen Bildrand grenzt. Falls der Himmel dort durch Bäume, einzelne Türme oder Ähnlichem unterbrochen ist, werden die einzelnen Abschnitte gefunden, da mehr als ein initialer Pixel verwendet wird. Das wählen von initialen Pixeln auf der ersten Zeile hilft zu vermeiden, dass statt Himmelsabschnitten andere helle Objekte gefunden werden, welche meist nur im mittleren und unteren Bildabschnitt auftauchen.

Außerdem wird der Algorithmus auf einem verkleinerten Bild durchgeführt, um Rechenzeit zu sparen und die erstellte Maske wird anschließend wieder auf die Größe des Originalbildes skaliert.

3.2 Evaluierung

Die Segmentierung spielt eine wichtige Rolle in der späteren Anwendung des Himmelsmodells von Perez und der weiteren Untersuchung des Himmels. Wird ein zu geringer Anteil des Himmels erkannt, werden Informationen verschenkt, die bei der Schätzung des Erscheinungsbildes des Himmels wichtig sein können. Werden hingegen auch Teile des Vordergrundes als Himmel markiert, so kann es passieren, dass schon die Schätzung der Bewölkung falsche Ergebnisse liefert und erst Recht die Schätzung der Position der Sonne nach Perez. In diesem Abschnitt soll deshalb untersucht werden, wie genau mit dem zuvor beschriebenen Vorgehen der Himmel erkannt werden kann.

Hierzu wurden 400 Bilder ausgewählt, die mit unterschiedlichen Kameras an unterschiedlichen Orten aufgenommen wurden. Auf allen ist wenigstens ein kleiner Teil des Himmels zu sehen. Diese wurden per Hand ausgewertet und dienten vor allem dem Auffinden von besonderen Szenarien, die Probleme bereiten. Einige dieser Bilder sind in Anhang A.2 abgebildet. Problemszenarien sollen nachfolgend betrachtet werden.

Aus den 400 Bildern wurden 60 zufällig ausgewählt, für die per Hand eine Maske für den Himmel erstellt wurde. Diese diente als Referenz, um sie mit der aus dem Bild berechneten Maske zu vergleichen. Es wurde ermittelt, wie viel Prozent der per Hand maskierten Himmelspixel bzw. Vordergrundpixel auch tatsächlich durch die beschriebenen Methoden markiert wurden.

Es ergab sich, dass im Durchschnitt 99.4% des Vordergrundes richtig markiert wurde und dass in 82% dieser Bilder der Vordergrund sogar zu 100.0% (bei Rundung auf eine Nachkommastelle) erkannt wurde. Dies beruht darauf, dass fast immer zu wenig Pixel des Himmels richtig markiert werden und der restliche als Vordergrund markierte Bereich den tatsächlichen Vordergrund vollständig mit einschließt. Zwar gehen dadurch Informationen über den Himmel verloren, da einige seiner Bereiche bei der späteren Auswertung nicht mehr betrachtet werden, allerdings ist es von viel größerem Vorteil, den Vordergrund sicher auszuschließen. Falsch als Himmel markierte Vordergrundpixel können das spätere Maskieren von Wolken und die Anwendung des Modells von Perez

stark beeinflussen.

Die Himmelspixel wurden im Durchschnitt zu 86.2% richtig markiert, wobei in fast der Hälfte der Bilder (48%) mehr als 95% der Himmelspixel korrekt markiert wurden, was für eine nachfolgende Analyse des Erscheinungsbildes des Himmels ausreichend ist.

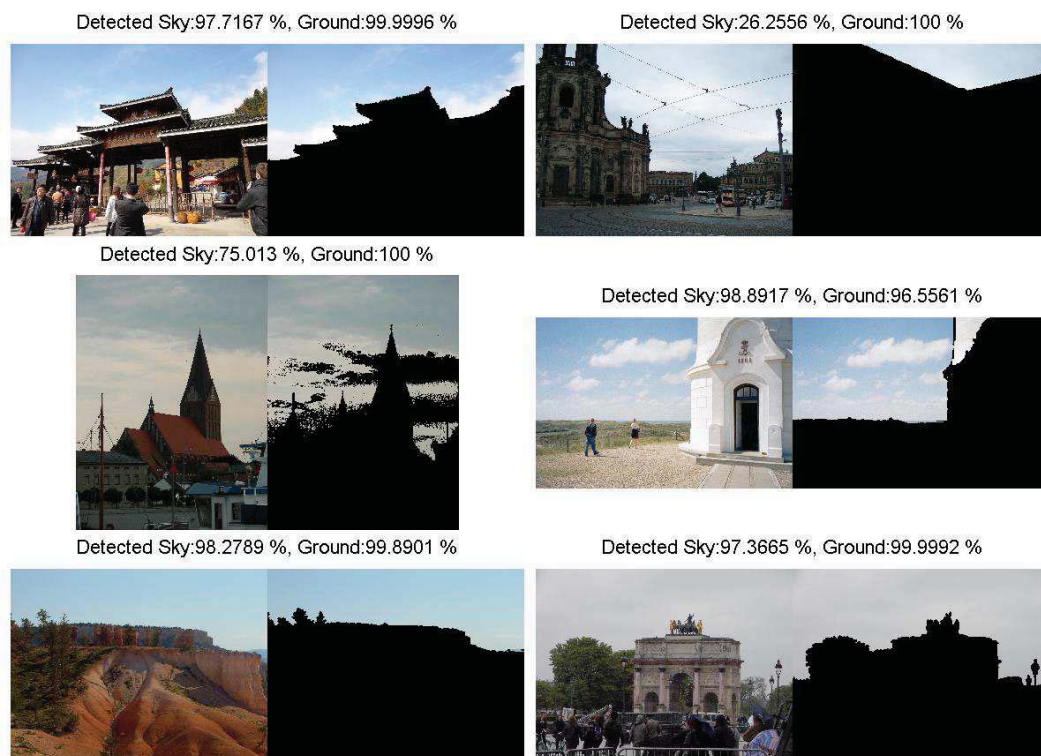


Abbildung 9: Einige der Testbilder und ihre jeweils berechneten Masken nach der beschriebenen Methode.

In Abbildung 25 sind einige der verwendeten Bilder zu sehen. Man kann erkennen, mit welchen Szenarien die beschriebene Methode zur Himmelssegmentierung noch Probleme hat.

Im Bild oben rechts sieht man eine Szene mit vielen Stromleitungen, die den Bereich des Himmels durchkreuzen. Da der Region-Growing Algorithmus von der ersten Bildzeile aus nach einer zusammenhängenden Region sucht, wird er

von den Stromleitungen „gestört“. Diese Szene taucht gelegentlich im Stadtbild auf, oft kann allerdings noch ein genügend großer Himmelsausschnitt erkannt werden. Diese Art von Problem ließe sich durch eine komplette Segmentierung des Bildes in homogene Abschnitte durch den Region-Growing Algorithmus beheben. Ähnliche Bildabschnitte mit entsprechenden Farbwerten könnten zusammengefasst und als Himmel maskiert werden. Der Nachteil wäre neben einer verlängerten Laufzeit, dass auch wieder helle Oberflächen, zum Beispiel von Gebäuden, schlecht vom Himmel und vor allem von einzelnen Wolken zu unterscheiden wären.

In der Mitte rechts ist erkennbar, dass weiße Gebäude, die den oberen Bildrand berühren, noch schlecht vom Himmel zu unterscheiden sind. Weil mehr als eine initiale Zelle in der ersten Bildzeile vom Region-Growing Algorithmus verwendet wird, kann in diesem Fall auch die Kante zwischen Gebäude und Himmel nicht sichern, dass ein Teil des Gebäudes als Himmel markiert wird.

In der Mitte links kann man erkennen, dass Farbtöne, die zu sehr im roten oder grünen Bereich liegen, auch als Vordergrund markiert werden. Dies ist ungünstig bei Szenen, die kurz nach Sonnenauf- bzw. vor Sonnenuntergang aufgenommen wurden, da hier ein breites Farbspektrum im Himmel auftreten kann. Würde man allerdings ein weiteres Farbspektrum im Himmel zulassen, würde auch ein großer Teil des Vordergrundes als Himmel eingestuft werden. Eine Möglichkeit besteht darin, das zugelassene Farbspektrum an den Aufnahmezeitpunkt zu koppeln. Diese war bei den verwendeten Testbildern allerdings nicht gegeben.

Insgesamt liefert die beschriebene Methode trotz der aufgeführten Problemszenarien im Allgemeinen gute Ergebnisse, auf denen im Folgenden aufgebaut werden soll.

4 Schätzung der Beleuchtung durch die Sonne

Der Himmel kann durch die verschiedensten Wolkenformationen sehr unterschiedliche Gestalten annehmen. Neben sehr klaren, blauen Himmeln können auch gleichmäßig bedeckte, zugezogene Himmel oder aber klare Himmel mit einzelnen Wolkenformationen auftreten. Bei letzteren kann es passieren, dass die Sonne nicht im Foto sichtbar ist und somit nicht allein an der Gestalt des fotografierten Himmels festgestellt werden kann, ob die Sonne von einer Wolke verdeckt wird oder direkt die Szene beleuchtet. In diesem Abschnitt soll erläutert werden, wie aus der Gestalt des Himmels und des Vordergrundes die Sichtbarkeit der Sonne v_s geschätzt werden kann.

In [2] werden verschiedene Merkmale des Bildes diskutiert, welche einen Aufschluss über die Sichtbarkeit der Sonne geben können. Einige dieser Merkmale sollen im Folgenden aufgegriffen werden. Wenn man zunächst Abbildung 10 betrachtet, kann man im linken, sonnigen Bild erkennen, dass harte Schattengrenzen entstehen, helle, sonnenbeschienene und dunkle, beschattete Bereiche im Vordergrund sichtbar sind und gesättigte blaue Himmel. Zum anderen, wenn die Sonne verdeckt ist, sind die Farben dumpf, der Himmel grau und es gibt keine sichtbaren Schatten.



Abbildung 10: Unterschiedliche natürliche Beleuchtungsszenarien

Die Merkmale der Sonnensichtbarkeit sollen auf dieser Intuition aufbauen und außerdem die beiden bereits segmentierten Regionen benutzen: der Himmel \mathcal{H} und der Vordergrund \mathcal{G} .

4.1 Merkmale des Himmels

Zunächst ist es von Interesse, ob im bereits segmentierten Himmel Wolken auftreten. Anschaulich unterscheiden sich die hellen Wolken vom blauen Hintergrund dadurch, dass ihre Farbsättigung deutlich geringer ist. Daher lassen sich Wolken leicht segmentieren, indem man das Bild in den HSV-Farbraum transformiert und ähnlich wie in Abschnitt 3.1 nach dem Verfahren von Otsu einen Schwellwert berechnet und diesen dann auf den Sättigungskanal anwendet. Wenn der Himmel zuvor hinreichend genau segmentiert wurde, erzielt man mit dieser Methode gute Ergebnisse.



Abbildung 11: Segmentierte Wolken. Links bei verhangenem Himmel, rechts bei klarem Himmel mit Wolken.

In Abbildung 11 kann man außerdem erkennen, dass die Anwendung des Schwellwertes dazu führt, dass bei zugezogenen Himmeln nicht die ganze Wolkendecke erkannt wird, sondern nur einzelne, kleine Bereiche. Das soll allerdings im Folgenden ausgenutzt werden, um festzustellen, wie klar oder zugezogen der Himmel tatsächlich ist. Man kann beobachten, dass bei zugezogenen Himmeln wie in Abbildung 11 links der Unterschied der Farbsättigung zwischen den segmentierten „Wolken“ und dem restlichen Himmel sehr gering ist, hingegen bei weißen Wolken vor einem klaren blauen Himmel sichtbar groß.

Zum einen erhält man somit durch die Berechnung der mittleren Sättigungen S_{wolken} und S_{himmel} beider Bereiche und der anschließenden Bildung des Quotienten $q = S_{himmel}/S_{wolken}$ einen Schätzwert zur Bestimmung der Art der Bewölkung. Ein zweiter Schätzwert ist die Sättigung des Himmels ohne Wolken S_{himmel} an sich. Es hat sich durch Anwendung auf verschiedene Bilder ergeben, dass die Bedingungen $q > 2$ und $S_{himmel} > 0.2$ gut zwischen klaren und zugezogenen Himmeln unterscheidet.

Sind beide Bedingungen erfüllt, so spricht das stark für einen klaren Himmel (eventuell mit Haufenwolken durchzogen). Es kann aber noch keine Aussage über die Sichtbarkeit der Sonne v_s gezogen werden, da sie von einer Wolke verdeckt sein könnte. Der Prozentsatz von Wolken im gesamten Himmel i_{wolken} soll aber im Folgenden als einer von drei Indikatoren genutzt werden. Ist eine der beiden nicht erfüllt, liegt ein bedeckter Himmel vor und $v_s = 0$.

4.2 Merkmale des Vordergrundes

Hat die vorhergehende Betrachtung ergeben, dass ein klarer Himmel im Bild zu sehen ist, so müssen weitere Merkmale, wie sie in [2] beschrieben werden, herangezogen werden.

Helle und dunkle Regionen

Bei der Betrachtung des Vordergrundes \mathcal{G} soll nun herausgefunden werden, ob es sichtbare sonnenbeschienene und beschattete Bereiche gibt. Dazu wird \mathcal{G} mithilfe des k -means-Algorithmus mit $k = 2$ in zwei Bereiche eingeteilt. Für beide wird die mittlere Helligkeit errechnet. Ist die Szene sonnenbeschienen, so ist der Unterschied dieser beiden Helligkeitswerte groß. Ist es hingegen zugezogen, so ist er geringer. Die Differenz von beiden $i_{hell,dunkel}$ soll als zweiter Indikator benutzt werden.

Kontraste

Um den Kontrast im Bild zu messen, soll das in [10] vorgestellte Maß benutzt und auf den Vordergrund \mathcal{G} angewandt werden. Es werden zunächst die Histogramme H_r , H_g und H_b der Graustufen des roten, grünen und blauen Kanals gebildet. Dann wird für $i = 1..256$ das zusammengesetzte Histogramm $H(i) = H_r(i) + H_g(i) + H_b(i)$ berechnet. Anschließend wird das Histogramm H normiert, da jedes Bild eine andere Größe haben kann. Die Höhe des Kontrastes im Bild $i_{kontrast}$ ist nun gleich der Breite der mittleren 98% der Masse des Histogramms. Je höher der Kontrast im Vordergrund ist, desto mehr spricht das für eine direkt von der Sonne angestrahlte Szene. $i_{kontrast}$ soll als dritter Indikator genutzt werden.

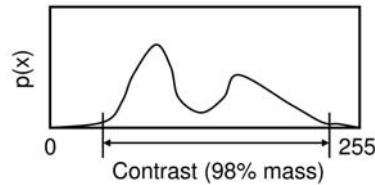


Abbildung 12: Illustriert ist, wie der Kontrast in einem Bild gemessen werden kann. Es wird das Graustufenhistogramm gebildet und die Breite der mittleren 98% der Fläche berechnet. Entnommen aus [10].

Sättigungswert

Die Farben in sonnenbeschienenen Szenen wirken oft kräftiger, was bedeutet, dass sie eine höhere Sättigung aufweisen. Somit bietet es sich an, den mittleren Sättigungswert des Vordergrundes zu berechnen. Allerdings muss eine Vielzahl von unterschiedlichen Szenen im Bild angenommen werden, was die Auswertung eines solchen Wertes stark erschwert. So ist zum Beispiel der Sättigungswert in Szenen mit viel Vegetation deutlich höher als in Bildern, in denen nur Straßen, Gebäude und ähnliches zu sehen sind, ganz unabhängig von der Sichtbarkeit der Sonne. Dies kann man in Abbildung 13 erkennen. Daher soll der Sättigungswert hier nicht in die Bestimmung der Sonnensichtbarkeit mit einfließen.



Abbildung 13: Links: Stark beleuchtete Szene mit geringem Sättigungswert (untere Zeile). Rechts: Bewölkte Szene mit hoher Sättigung.

4.3 Schätzung der Sonnensichtbarkeit v_s

Im dem Fall, dass zumindest ein Teil des Himmels, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, als klar eingestuft wurde, soll nun aus den drei Indikatoren i_{wolken} , $i_{hell,dunkel}$ und $i_{kontrast}$ die Sichtbarkeit der Sonne v_s geschätzt werden. Bei Bestimmung dieser Werte für eine große Anzahl von Bildern und verschiedene Beleuchtungsszenarien ergab sich, dass die Bedingungen

$$i_{hell,dunkel} > 0.4$$

$$i_{kontrast} > 220$$

$$i_{wolken} > 0.5$$

jeweils auf eine sichtbare Sonne hinweisen. Sind die Bedingungen jeweils nicht erfüllt, spricht das für eine bedeckte Sonne. Es soll $v_s = 1$ gelten, wenn die Mehrzahl der Bedingungen erfüllt ist, bzw. $v_s = 0$, falls die Mehrzahl nicht erfüllt ist. Diese Methode ist einfach, liefert aber gute Ergebnisse.



Abbildung 14: Einige Beispielauswertungen zur Sichtbarkeit der Sonne

5 Korrektur der Sonnenposition

Leider ist der gemessene Azimutwinkel der Kamera ϕ_c , welcher über einen eingebauten Kompass gemessen wird, oft ungenau und kann leicht abgelenkt werden. Dieser wird aber benötigt, um die relative Sonnenposition zur Kamera und somit die Beleuchtungsrichtung zu bestimmen. Um ein 3D-Objekt nahtlos in eine reale Umgebung einzufügen, sollte diese Beleuchtungsrichtung möglichst genau bestimmt werden. Deshalb soll in diesem Kapitel erläutert werden, wie man aus dem Bild Informationen gewinnen kann, um die Genauigkeit des relativen Azimutwinkels ϕ_c der Sonne zu verbessern.

Zunächst muss gesagt werden, dass nachfolgende Methoden nicht für Himmel angewendet werden können, die bereits als vollständig zugezogen eingestuft wurden. Es ist offensichtlich, dass sich in solchen Fällen nicht die Position der Sonne aus dem Erscheinungsbild des Himmels schätzen lässt. Auch wenn die Sonne von einer einzelnen Wolke verdeckt ist, macht es keinen Sinn, die Richtung der Schatten ermitteln zu wollen, da diese für die Beleuchtung unerheblich ist. Somit werden nur Bilder betrachtet, für die bereits $v_s = 1$ ermittelt wurde. Außerdem sollen nur solche Bilder verwendet werden, in denen mindestens in 5% des Bildes unbewölkter Himmel sichtbar ist.

5.1 Entfernung der Eckenabschattung

Bei der Aufnahme von Bildern mit preiswerten Kameras, wie sie in Smartphones und anderen mobilen Geräten verwendet werden, entstehen zahlreiche Effekte wie zum Beispiel Verzerrungen, Rauschen und Ähnliches [9]. Im Folgenden soll vor allem der Farbverlauf des Himmels näher analysiert werden, welcher durch die Vignettierung (eine Abschattung zum Bildrand hin) beeinflusst wird.

Die Vignettierung einer Kamera kann relativ einfach kalibriert werden, indem diese auf ein gleichmäßig beleuchtetes, weißes Objekt gerichtet wird und viele schwarz-weiß Aufnahmen gemacht werden. Aus diesen wird dann ein gemittelttes Bild erstellt und anschließend weichgezeichnet, um Rauschen und Unregelmäßigkeiten im Sensor der Kamera oder der weißen Fläche zu beseitigen. Das Ergebnis wird noch einmal normalisiert, sodass der hellste Bereich des Bildes auf Einheitsweiß skaliert wird. Um die Vignettierung zu entfernen, kann eine Aufnahme einfach durch das erhaltene Bild dividiert werden. [9]



Abbildung 15: Textur der Vignettierung der Kamera des Samsung GT-i9001, erstellt aus 7 Einzelaufnahmen.

5.2 Verwendung des Himmelsmodells von Perez

Zunächst lässt sich ϕ_c grob schätzen indem, das in Abschnitt 2.2 beschriebene Himmelsmodell von Perez verwendet wird. In [3] wurde zusammen mit der Anwendung des Modells zur Ermittlung von Kameraparametern auch der zugehörige Quellcode unter [4] veröffentlicht, welcher hier verwendet werden soll.

Zum einen wird eine Methode `convertTurbidityToSkyParams(t,Lz)` zur Verfügung gestellt, welche aus dem Lufttrübungsfaktor t und der Luminanz des Zenitpixels L_z die Himmelsparameter a , b , c , d und e errechnet und zusammen mit L_z als einzigen Parameter `params` zurückgibt.

Die zweite verwendete Methode ist `reconstructSkyFromFullModel(imgDims, params, vh, f, phiCam, thetaSun, phiSun)`, welche aus den Bilddimensionen, den zuvor errechneten Himmelsparametern `params`, der Horizontlinie `vh`, der Brennweite `f`, dem Azimutwinkel der Kamera `phiCam` und dem Zenit- und Azimutwinkel der Sonne `thetaSun` und `phiSun` das Aussehen des Himmels nach dem Modell von Perez für einen Ausschnitt entsprechend der übergebenen Bilddimensionen errechnet. Diese Methode entspricht der Gleichung (2), welche die absolute Luminanz L_z der Himmelspixel berechnet. Sie soll nun verwendet werden, um wie in (7) den Winkel ϕ_c (bzw. `phiCam`) zu schätzen und nachfolgend mit dem bereits gemessenen Winkel zu vergleichen.

Der Parameter `imgDims` erschließt sich aus dem übergebenen Bild, `f` ist nach Annahme ein bekannter Kameraparameter und `thetaSun`, `phiSun` können wie in 2.1 aus Kameraparametern errechnet werden. Somit müssen zunächst noch folgende Unbekannte bestimmt werden:

Horizontlinie `vh`

Die Horizontlinie v_h wird angegeben in Pixeln als Abstand von der Bildmitte. Ist also $v_h = 0$, so liegt der Horizont mittig im Bild. Sie lässt sich mithilfe der Brennweite f und dem Zenitwinkel der Kamera θ_c berechnen:

$$v_h = -f \cdot \tan(90^\circ - \theta_c) \quad (8)$$

Lufttrübungsfaktor `t`

Da das Himmelsmodell nur auf den bereits im vorhergehenden Kapitel segmentierten unbewölkten Himmel angewandt wird, kann für den Lufttrübungsfaktor t ein Wert angenommen werden, der einem klaren Himmel entspricht. Dies ist, wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, ein Wert von $t = 2,17$.

Zenitluminanz L_z

In den meisten Außenaufnahmen ist die Kamera fast nie auf den Himmel allein gerichtet und somit ist auch nicht sein Zenit zu sehen. Daher muss hier die Zenitluminanz L_z aus dem sichtbaren Himmel geschätzt werden. Die oben erwähnte Methode `reconstructSkyFromFullModel` erzeugt Bilder im CIE xyY Farbraum (welcher eine Transformation des CIE 1931 XYZ Farbraumes ist), da dieser laut [3] am besten für die Berechnung des Himmelsmodells von Perez geeignet ist. Hierbei enthalten x und y Informationen über den Farbwert und Y über die Helligkeit einer Farbe. Die Zenitluminanz L_z wird deshalb auch in diesem Farbraum angegeben. Um sie zu schätzen, wird das ursprüngliche Bild in den xyY Farbraum konvertiert und ein Mittelwert über alle bereits segmentierten Himmelspixel (ohne Wolken) ermittelt. Der x- und y-Anteil dieses Wertes kann als eine grobe Schätzung von $L_z = (x, y, Y)$ verwendet werden und liefert gute Ergebnisse. Da sich der Helligkeitswert Y stärker über den Himmel hinweg verändert, soll er als zweite Unbekannte neben ϕ_c behandelt werden und wird ebenso diskretisiert.

Wie im Ausdruck (7) wird die Funktion `reconstructSkyFromFullModel` nun auf verschiedene Werte von ϕ_c und Y angewendet und die berechneten Himmelspixel mit den Himmelspixeln aus dem Originalbild verglichen. Für jedes ϕ_c ergibt sich ein Fehler. Wird dieser normiert ergibt sich ein Bild wie in Abbildung 16. Je röter ein Kreissegment ist, desto geringer ist der Fehler zwischen dem Modell von Perez und dem tatsächlichen Himmel. Die blaue Linie markiert die über den Kompass gemessene Kamerablickrichtung.

Es ist auffällig, dass die Fehler über einen großen Winkelbereich hinweg sehr rot, also sehr nah am minimalen Fehler liegen. Dies ist nicht nur für dieses Beispiel der Fall, sondern zeigt sich bei vielen verwendeten Bildern. Es zeigt, dass die Bestimmung der Sonnenposition durch den Vergleich mit dem Modell von Perez nur ungenau sein kann und nur als Indiz verwendet werden sollte.

Bei genauerer Betrachtungsweise erkennt man auch, dass es neben dem globalen Minimum noch weitere lokale Fehlerminima gibt. In Abbildung 16 sind

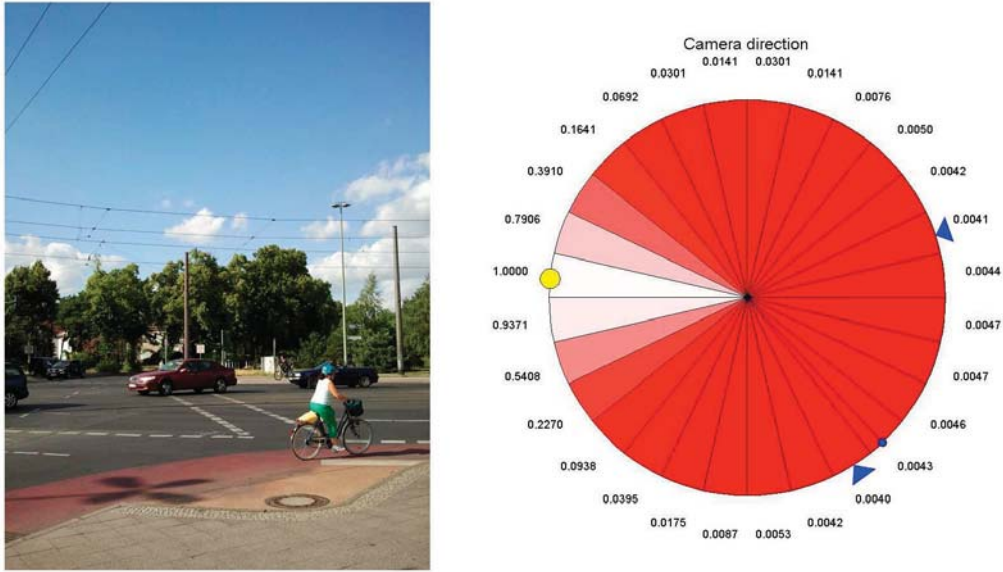


Abbildung 16: Schätzung des Azimutwinkels der Kamera ϕ_c . Links: das Originalbild. Rechts: Darstellung der Fehler bei Vergleich des Originalhimmels mit dem geschätzten Himmelsmodell nach Perez für verschiedene Azimutwinkel ϕ_c . Der gelbe Punkt markiert die errechnete Sonnenposition. Ein kleiner blauer Punkt kennzeichnet die vom Kompass gemessene Blickrichtung der Kamera. Zwei blaue Dreiecke markieren die beiden Fehlerminima.

diese markiert. Da in fast allen untersuchten Bildern zwei, manchmal auch mehr lokale Fehlerminima auftreten und sich dieser Fehler kaum vom global minimalen Fehler unterscheidet, sollen im Weiteren immer wenigstens die zwei kleinsten lokalen Minima betrachtet werden, wenn vorhanden.

In Abbildung 17 sind für verschiedene Bilder die Fehler für unterschiedliche ϕ_c und die zu den beiden Minima gehörenden Schattenrichtungen abgebildet. Dabei steht ein blauer Schatten für das globale Fehlerminimum über alle ϕ_c und der cyan-farbene Schatten ist das zweite lokale Minimum. Zum einen kann man erkennen, dass in allen Bildern einer der beiden Schatten gut die tatsächliche Schattenrichtung trifft. Allerdings ist dies nicht immer nur das globale Fehlerminimum, weshalb im nachfolgenden Abschnitt überprüft werden soll, welcher der beiden Winkel für ϕ_c am ehesten zutreffen kann.



Abbildung 17: Schätzung des Azimutwinkels der Kamera: In der mittleren Spalte sind die zu den Fehlerminima gehörigen Schatten eingezeichnet. Ein blauer Schatten kennzeichnet das globale Minimum. Ein cyan-farbener Schatten das zweite beste lokale Minimum.

5.3 Betrachtung der Schattenrichtung

Da in diesem Kapitel nur Bilder betrachtet werden, für die gilt, dass die Sichtbarkeit der Sonne den Wert $v_s = 1$ annimmt, kann davon ausgegangen werden, dass in den meisten dieser Bilder auch Schatten auftauchen. Sind diese parallel zu einer der bereits zuvor ermittelten Schattenlinien, so ist das ein Hinweis darauf, dass diese den tatsächlichen Azimutwinkel ϕ_c repräsentiert. In diesem Abschnitt soll eine sehr einfache Methode aufgezeigt werden, um dies zu schätzen.

Für beide bereits ermittelten Schattenrichtungen wird Folgendes ausgeführt: Zunächst wird das Bild gedreht, sodass die jeweils zu betrachtende

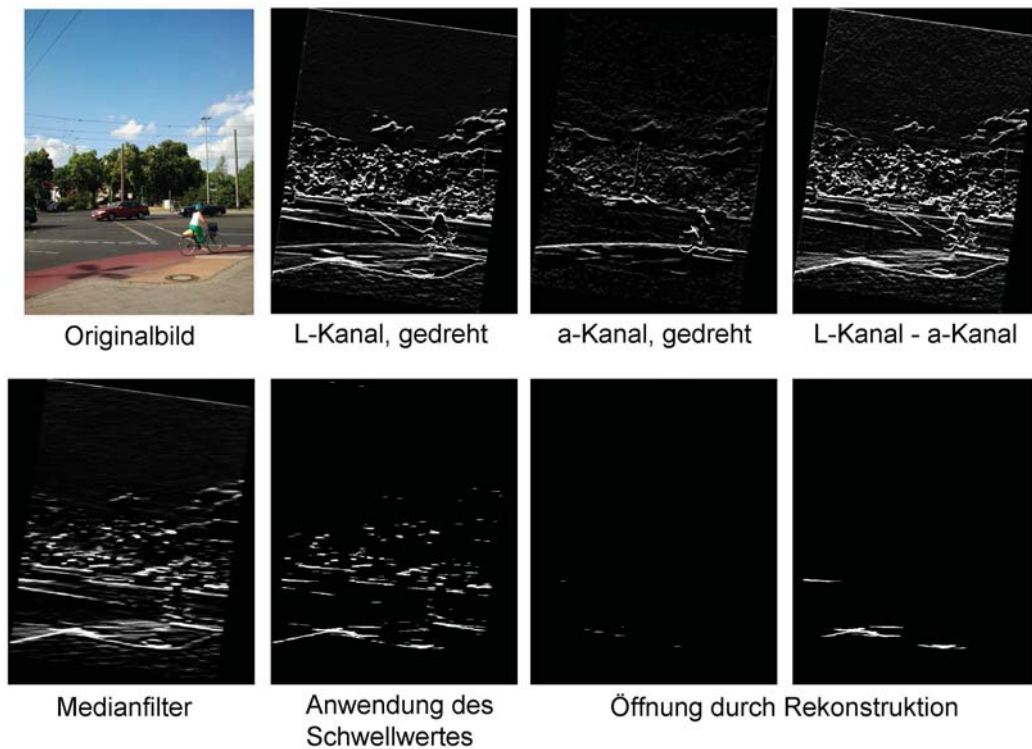


Abbildung 18: Schrittfolge zum Finden von waagerechten Schatten

Schattenlinie waagrecht im Bild liegt. Dies erlaubt, dass nur nach Schatten gesucht werden muss, die ebenfalls in der Waagerechten liegen und auch entsprechende Filter waagrecht angewandt werden können.

Wie in [1] bzw. [7] beobachtet wird, können Schattenkanten am besten im CIELAB-Farbraum im L-Kanal erkannt werden, wohingegen „normale“ Kanten sowohl im L- als auch im α -Kanal auftauchen. Daher wird das Bild nun zunächst in den CIELAB-Farbraum konvertiert und ein zweidimensionaler Medianfilter angewandt, um Rauschen zu vermindern. Anschließend wird die Ableitung sowohl im L- als auch im α -Kanal in y -Richtung gebildet (da nur waagerechte Kanten von Bedeutung sind). Werden nun beide voneinander subtrahiert, ermöglicht es das Ausschließen von vielen Kanten, welche keine Schatten sind. Dies lässt sich in Abbildung 18 im vierten Bild der ersten Zeile erkennen, in dem eine lange, gekrümmte Linie, die sowohl im L- als auch im α -Kanal auftritt, nicht mehr sichtbar ist.

Durch die erneute Anwendung eines Medianfilters, welcher nur einen Pixel hoch und hier 50 Pixel breit ist, werden vertikale Kanten abgeschwächt und horizontale bleiben bestehen. Alle Pixel, die nun unterhalb eines Schwellwertes von 0.9 liegen, werden auf den Wert 0 gesetzt. Somit bleiben nur starke Kanten übrig. Da nur lange, waagerechte Kanten extrahiert werden sollen, wird bei anschließender Öffnung durch Rekonstruktion eine lange, waagerechte Linie als strukturierendes Element benutzt.

Übrig bleiben Pixel, die auf Schatten hinweisen. In Abbildung 18 im letzten Bild ist zu erkennen, dass der Schatten der Laterne, des Autos und der schattenfarbene Gullideckel markiert wurden. Je mehr Schattenlinien im selben Winkel wie der errechnete Schatten liegen, desto mehr weiße Pixel bleiben am Ende übrig. Wendet man dies auf beide zuvor errechneten Schattenrichtungen an, summiert die weißen Pixel und bildet den Quotienten aus beiden Summen, so gibt dieser einen guten Hinweis, ob das zweite lokale Minimum gegenüber dem globalen Minimum zu bevorzugen wäre.

Ein Problem dieser Methode ist es, wenn durch einen ungenau gemessenen Kippwinkel der Kamera die Horizontlinie nicht korrekt berechnet wurde. Dies führt zu einer leicht abweichenden Darstellung der berechneten Schatten im Bild. In Abbildung 19 lässt sich erkennen, dass bei einer abweichenden Horizontlinie und gleichbleibendem Schattenwinkel die errechnete blaue Schattenlinie nicht mehr parallel zu den Schatten im Bild ist. Dies erschwert das Erkennen von parallelen Schatten selbst wenn der Azimutwinkel der Kamera korrekt mit Hilfe des Himmelsmodelles von Perez bestimmt wurde.

5.4 Auswahl des bestmöglichen Azimutwinkels ϕ_c

Nach Überprüfung der Schattenrichtung liegen nun also drei mögliche Winkel für den Azimutwinkel der Kamera ϕ_c vor. Dies ist zum einen der durch den Kompass gemessene Azimutwinkel $\phi_{c,c}$, und die beiden aus dem Erscheinungsbild des Himmels berechneten Winkel $\phi_{c,h1}$ und $\phi_{c,h2}$. Dabei soll $\phi_{c,h1}$ der Azimutwinkel sein, der bei Betrachtung der Schattenrichtung eher als Azi-



Abbildung 19: Korrekte und ungenaue Horizontlinie bei gleichem Schattenwinkel.

mutwinkel der Kamera in Frage kommt. Nun soll entschieden werden, welcher Winkel zur Beschreibung der Beleuchtungssituation gewählt werden soll und vor allem, ob der gemessene Azimutwinkel durch den Kompass korrekt bestimmt wurde.

Es hat sich herausgestellt, dass sowohl die Messung durch den Kompass als auch die Schätzung des Azimutwinkels der Kamera durch Betrachten des Himmels teilweise ungenau sind. Daher soll, wenn der Unterschied zwischen $\phi_{c,c}$ und $\phi_{c,h1}$ kleiner als 60° ist, der Mittelwert beider als geschätzter Wert für ϕ_c übernommen werden. Es kann angenommen werden, dass somit die Messung durch den Kompass bestätigt wurde.

Ist dies nicht der Fall, so wird betrachtet, ob der Unterschied zwischen $\phi_{c,c}$ und $\phi_{c,h2}$ kleiner ist als 20° . Wenn dem so ist, wird auch der Mittelwert beider Winkel gebildet. Hierbei soll ebenfalls angenommen werden, dass die Messung des Kompass bestätigt wurde und die Schätzung des Azimutwinkels durch Betrachtung der Schattenrichtung fälschlicherweise $\phi_{c,h1}$ als bessere Wahl bewertet wurde.

Tritt keiner der zwei Fälle ein, so soll angenommen werden, dass der Azimutwinkel falsch durch den Kompass gemessen wurde. Nun wird $\phi_{c,h1}$ abschließend als geschätzter Azimutwinkel der Kamera gewählt. Im nächsten Kapitel wird auf die Ergebnisse des Algorithmus noch genauer eingegangen.

6 Ergebnisse

Aus den Überlegungen der vorangegangenen Kapitel liegen nun für ein Bild die aus den Parametern errechnete Sonnenposition (θ_s, ϕ_s) , die gemessene und anhand des Bildes überprüfte Blickrichtung der Kamera (θ_c, ϕ_c) und somit auch die relative Position der Sonne im Bild $(\Delta\theta_s, \Delta\phi_s)$ vor. Zusammen mit v_s ist die Beschreibung der Beleuchtungssituation komplett und aus diesen Angaben kann abschließend eine Environment Map erstellt werden.

Ist $v_s = 1$, also die Szene direkt beleuchtet, so wird mithilfe des Himmelsmodells von Perez das Erscheinungsbild der Himmelskuppel über den sichtbaren Bereich im Bild hinaus extrapoliert. Der im Bild sichtbare Teil des Himmels wird direkt in die Environment Map übernommen. Siehe hierzu zum Beispiel Abbildung 20.

Ist $v_s = 0$, so kann der Himmel nicht extrapoliert werden. Da die Sonne verdeckt ist, soll vereinfacht angenommen werden, dass Licht aus allen Richtungen gleichmäßig die Szene beleuchtet. Deshalb wird jedem Himmelssegment eine zufällige Helligkeit und Farbe aus dem sichtbaren Teil des Himmels zugewiesen. Mit einem Medianfilter wird anschließend die entstandene Environment Map geglättet. Zeilenweise wird über die Farbwerte des Himmels im Bild der Durchschnitt gebildet und über den Bildausschnitt fortgeführt. Der im Bild sichtbare Teil des Himmels wird auch hier direkt in die Environment Map übernommen. Siehe hierzu zum Beispiel Abbildung 22.

In den nachfolgenden Abbildungen wird der beschriebene Algorithmus noch einmal im Ganzen an Testbildern dargestellt. In Abbildung 20 wird eine durch den Kompass korrekt bestimmte Schattenrichtung bestätigt, in Abbildung 21 eine falsch bestimmte korrigiert.

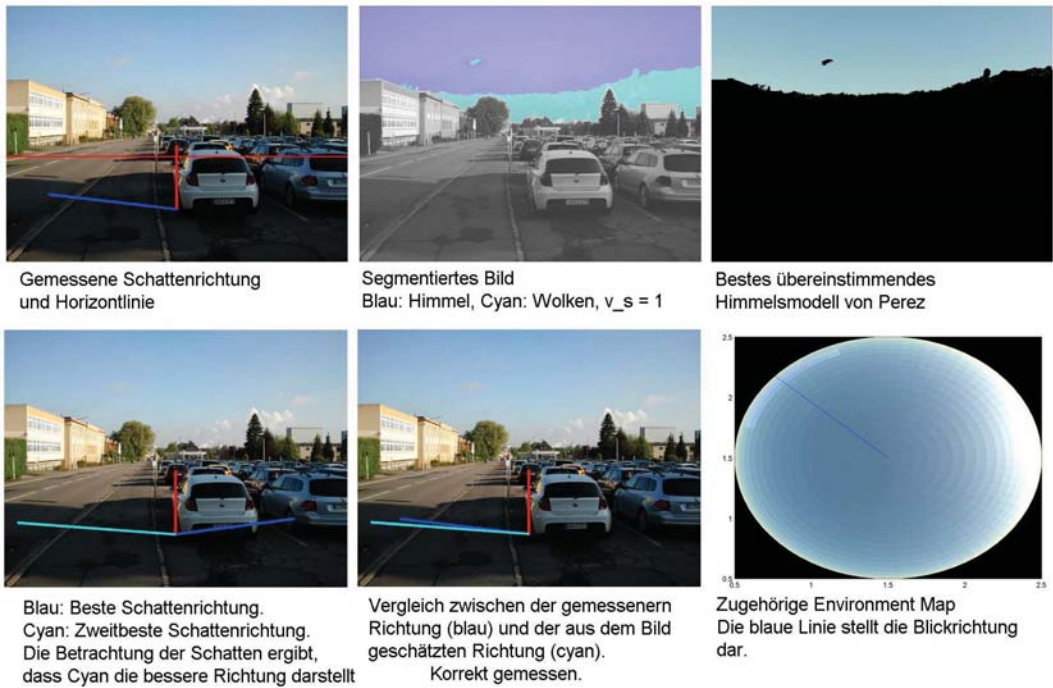


Abbildung 20

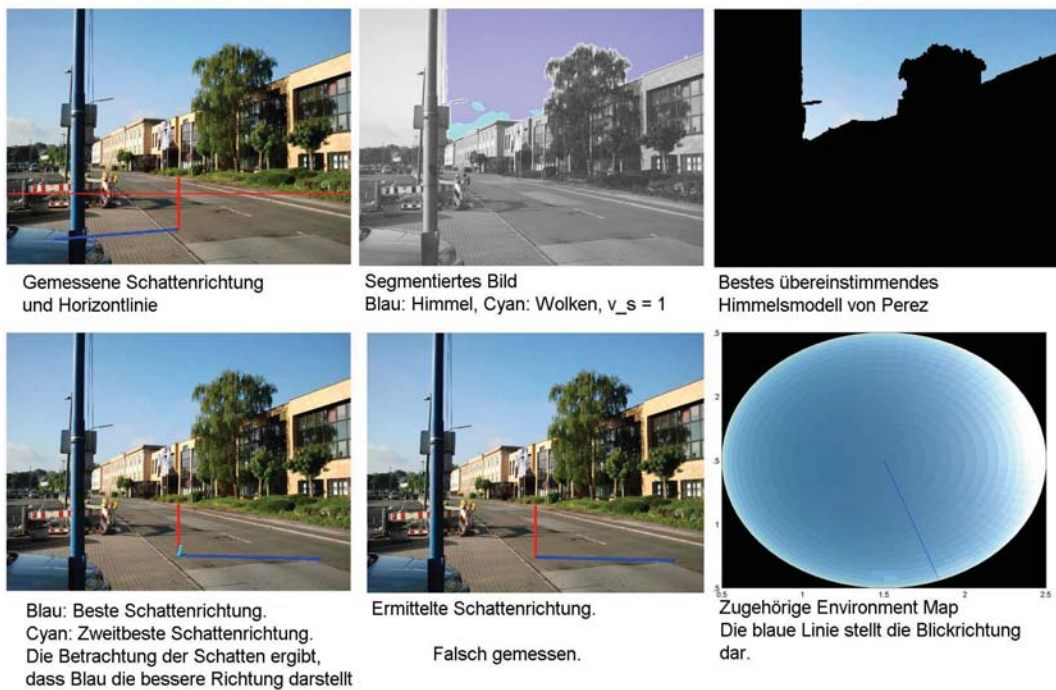


Abbildung 21



Abbildung 22: Erstellte Environment Map für einen bewölkten Himmel

Obwohl sowohl die Messung durch den Kompass als auch die Schätzung aus dem Bild beide fehleranfällig sind, kann im Zusammenspiel von beiden sehr oft ein gutes Ergebnis erzielt werden. Der Erfolg hängt aber stark von der Größe des sichtbaren klaren Teils des Himmels ab.

Unstimmigkeiten können dann auftreten, wenn zum Beispiel die gemessene Kamerarichtung falsch ist und von den beiden aus dem Bild geschätzten Richtungen eine falsch und eine richtig ist. Stimmen beide falschen Richtungen überein, so nimmt der Algorithmus die falsch gemessene Richtung als korrekt an.

Ein weiteres Problemszenario ist, wenn die Sonne im Bild sichtbar ist oder knapp außerhalb des Bildausschnittes liegt. Da viele Kameras Farb- und Kontrastkorrekturen durchführen, wird durch die Helligkeit der Sonne der Rest des Bildes stark verdunkelt. Dadurch kann der Himmel nicht mehr gut segmentiert werden und die Anwendung des Himmelsmodells von Perez versagt.

In den Abbildungen 23 und 24 wurde nun im Vergleich der Algorithmus aus [1] angewandt, welcher ohne zusätzliche Parameter auskommt. In Abbildung 23 kann man erkennen, dass die zusätzliche Verwendung von Parametern zu besseren Ergebnissen führen kann. Ein Grund dafür kann sein, dass bereits bei der Anwendung des Himmelsmodells von Perez und der Betrachtung der Schattenrichtung der Zenitwinkel vorliegt und nur noch ein passender Azimutwinkel ermittelt werden muss.



Abbildung 23: Anwendung des Algorithmus aus [1] auf beide bereits betrachtete Testbilder

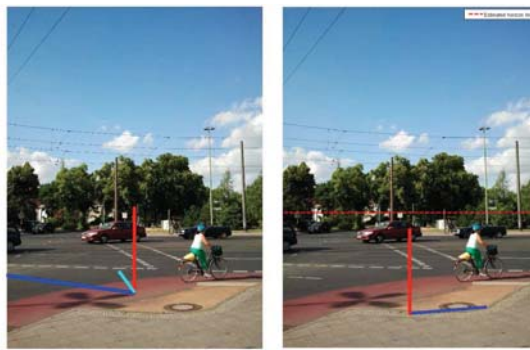


Abbildung 24: Links: Die blaue Schattenlinie repräsentiert die gemessene Sonnenposition. Die cyanfarbene Linie repräsentiert die aus dem Bild geschätzte Sonnenposition. Beide sind offensichtlich falsch. Rechts: Anwendung des Algorithmus aus [1] auf das selbe Bild.

Der in [1] beschriebene Algorithmus ist in den meisten Fällen, wenn genügend vertikale Oberflächen oder Schatten vorhanden sind, sehr genau. Abbildung 24 zeigt zum Beispiel, dass in anderen Szenen dieser Algorithmus die Sonnenposition korrekt bestimmt, wohingegen der hier vorgestellte Algorithmus versagt.

Abschließend kann gesagt werden, dass mithilfe vorhandener Parameter die Beleuchtungssituation in Bildern gut geschätzt werden und dabei auch falsch gemessene Azimutwinkel der Kamera gut korrigiert werden können, auch ohne die Verwendung maschinellen Lernens.

A Anhang

A.1 Quellcode von der CD starten

Der auf der beigelegten CD enthaltene MATLAB-Quellcode ist im Verzeichnis `cod` enthalten. Es werden dabei drei Pakete benötigt, die ebenfalls beigelegt sind:

1. **sun_position**: Enthalten ist die Methode `sun_position.m`, welche die in [6] beschriebenen Algorithmus zur Berechnung des Sonnenstandes implementiert. Zu finden ist es unter:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4605-sunposition-m>
2. **optprop** Dieses Paket enthält verschiedene Werkzeuge zur Farbkonvertierung zwischen verschiedenen Farbräumen wie z.B. RGB, CIELAB oder xyY. Zu finden ist es unter:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13788-optprop-a-color-properties-toolbox>
3. **jflalonde/skyModel** Dieser MATLAB Code implementiert das Himmelsmodell von Perez, welches in [3] auf Aufnahmen angewandt wurde. Zu finden ist es unter:
<http://w3.gel.ulaval.ca/~jflalonde/software.html>
4. **subplot** Dieses Paket enthält eine Methode zur unkomplizierten Darstellung mehrerer Bilder in einem MATLAB-Fenster. Zu finden ist es unter:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3696-subaxis-subplot>

Um diese Pakete einzubinden, reicht es, das Skript `setpath.m` aufzurufen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Algorithmen werden im Skript `main.m` an einem Bild beispielhaft ausgeführt. Für Bilder im Ordner `img` kann die Bildnummer in die Variable `img_number` eingetragen werden, um den Algorithmus darauf anzuwenden. Die Kameraparameter sind für diese Bilder bereits gespeichert. Das Skript `findskytest.m` kann genutzt werden, um den Algorithmus zur Himmelssegmentierung an mehreren Bildern zu testen.

A.2 Übersicht über enthaltenes Bildmaterial

Das auf der beigefügten CD enthaltene Bildmaterial ist im Verzeichnis `img` enthalten. In diesem Ordner sind solche Aufnahmen enthalten, die von der Kamera des Samsung GT-i9001 aufgenommen wurden und für welche die Kameraparameter bereits aufgezeichnet wurden und im MATLAB-Quellcode verfügbar sind. Die Unterordner enthalten folgende Bilder:

- **computed:** Enthalten sind zu jedem im Ordner `img` zu findenden Bild verschiedene, vom MATLAB-Programm erzeugte Grafiken zu finden.
- **data:** Dieser Ordner enthält zu jedem im Ordner `img` enthaltenen Bild ein solches, welches die Kameraparameter enthält.
- **find_sky_test_all:** Enthalten sind etwa 400 Aufnahmen von verschiedenen Kameras, welche zum Testen des Algorithmus zur Himmelssegmentierung vorgesehen sind. Für sie liegen keine Kameraparameter vor.
- **find_sky_test_mask:** Enthalten sind 60 von Hand erstellte Masken für eine Auswahl von Bildern aus dem Ordner `find_sky_test_all`. Sie dienen dazu, den Algorithmus zur Himmelssegmentierung zu evaluieren.
- **find_sky_test_samsung:** Enthalten sind etwa 60 Bilder, die nur von der Kamera des Samsung GT-i9001 aufgenommen wurden. Auch sie können zum Testen der Himmelssegmentierung genutzt werden.
- **samsung vignetting:** Enthalten sind die Bilder, die zur Auswertung der Vignettierung der Kamera des Samsung GT-i9001 benutzt wurden.
- **tex:** In diesem Ordner sind die in der Arbeit gedruckten Bilder enthalten.

Im Folgenden sind einige der 400 Testbilder für die Himmelssegmentierung abgebildet.

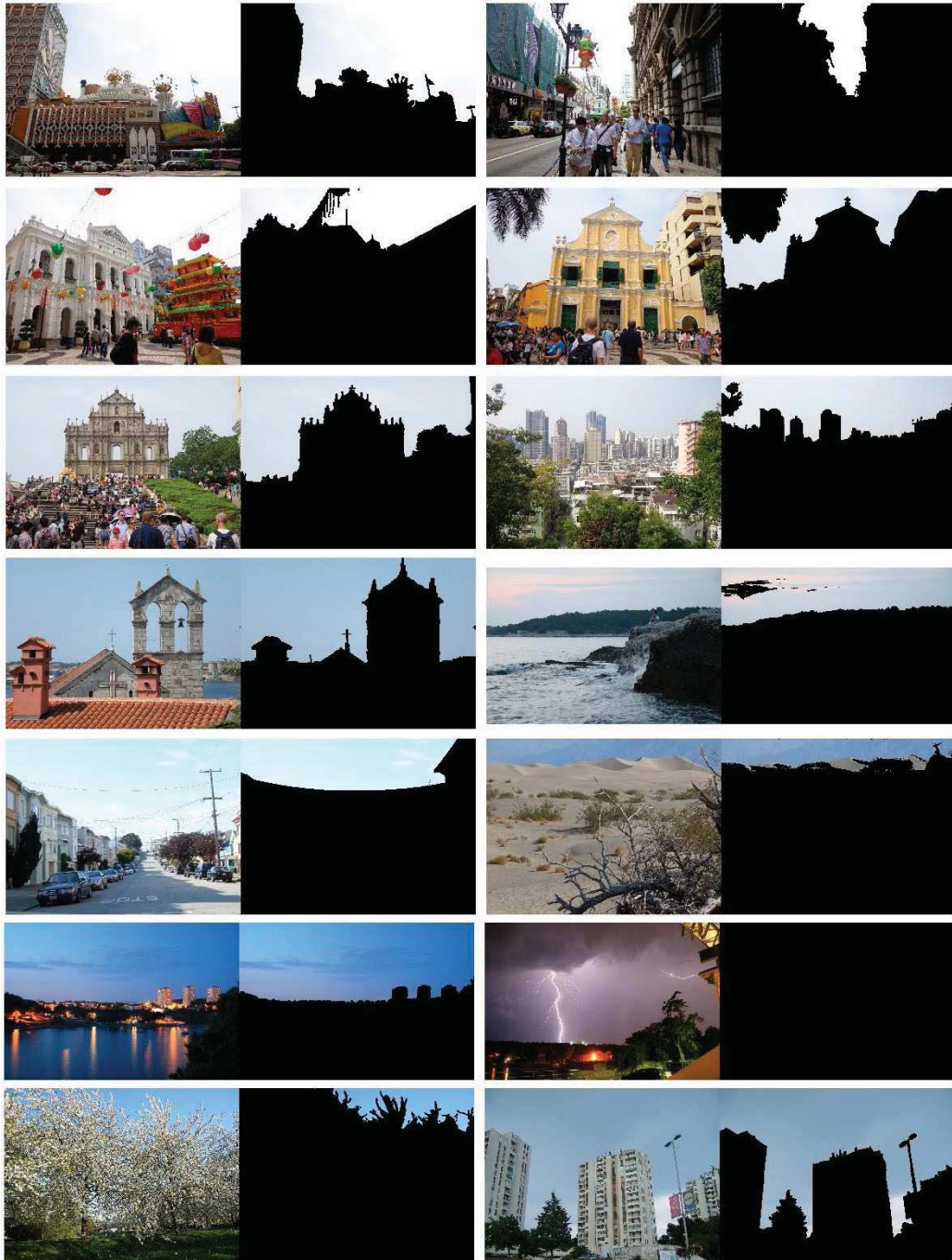


Abbildung 25

Literatur

- [1] Jean-François Lalonde, Alexei A. Efros und Srinivasa G. Narasimhan. Estimating natural illumination from a single outdoor image. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2009.
- [2] Jean-Francois Lalonde. Understanding and Recreating Visual Appearance Under Natural Illumination (2011). *Dissertations*. Paper 64.
- [3] Jean-Francois Lalonde, Srinivasa G. Narasimhan und Alexei A. Efros. What do the sun and the sky tell us about the camera? *International Journal on Computer Vision*, Mai 2010.
- [4] <http://w3.gel.ulaval.ca/~jflalonde/software.html> (24.07.2013)
- [5] R. Perez, R. Seals und J. Michalsky. All-weather model for sky luminance distribution - preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, März 1993.
- [6] I. Reda und A. Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. Technical Report NREL/TP-560-34302, National Renewable Energy Laboratory, November 2005.
- [7] Erum Arif Khan, Erik Reinhard. Evaluation of Color Spaces for Edge Classification in Outdoor Scenes. *IEEE International Conference on Image Processing*, S. 952–955. September 2005.
- [8] A. J. Preetham, P. Shirley und B. Smits. A practical analytic model for daylight. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1999*, August 1999.
- [9] G. Klein und D. W. Murray. Simulating Low-Cost Cameras for Augmented Reality Compositing. In *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, Nr. 3, S. 369-380, Mai/Juni 2010.
- [10] Y. Ke, X. Tang und F. Jing. The Design of High-Level Features for Photo Quality Assessment. In *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006.

- [11] Kevin Dale, Micah K. Johnson, Kalyan Sunkavalli, Wojciech Matusik und Hanspeter Pfister. Image restoration using online photo collections. In *International Conference on Computer Vision*, 2009.

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Weiterhin erkläre ich, eine Bachelorarbeit in diesem Studienggebiet erstmalig einzureichen.

Berlin, den 3. Juli 2013

.....