

Schattenentfernung aus Farbbildern mit dem Retinex-Algorithmus

Laura Jensen

Laura.Jensen@uni-bonn.de

TR-IGG-P-2008-01

February 06, 2008



Technical Report Nr. 1, 2008

Department of Photogrammetry
Institute of Geodesy and Geoinformation
University of Bonn

Available at
<http://www.ipb.uni-bonn.de/papers/>

Schattenentfernung aus Farbbildern mit dem Retinex-Algorithmus

Laura Jensen

1 Allgemeines

Die Schattenentfernung aus Farbbildern nach [Finlayson *et al.*, 2006] gliedert sich in Schattenkantendetektion und Schattenentfernung. Zur Schattenkantendetektion wird aus einem Farbbild ein beleuchtungsinvariantes Grauwertbild berechnet, das keine Schatten mehr enthält. Durch Vergleich der Kanten des Farbbildes mit den Kanten des schattenfreien Grauwertbildes erhält man die Schattenkanten. Entfernt werden die Schatten durch Nullsetzen der Schattenkanten in den Kanalbildern der drei Kanäle und Reintegration dieser Bilder. Das folgende Schema veranschaulicht den Prozess:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Bild} & \rightarrow & \text{Ableitung} & \rightarrow & \text{Entf. d. Schattenkanten} & \rightarrow & \text{Integration}(\Rightarrow \text{schattenfrei}) \\ f & \rightarrow & f' & \rightarrow & \tilde{f}' & \rightarrow & \tilde{f} \end{array}$$

Bei der Reintegration wurden zwei Vorgehensweisen diskutiert¹. Bei der ersten Methode nach [Weiss, 2001] wird für jeden Kanal j die Poisson-Gleichung gelöst. Es handelt sich um eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung. Es wäre hier also ein Randwertproblem zu lösen, was eine sehr komplexe Aufgabe in der Mathematik darstellt.

Deshalb wurde die zweite, wesentlich zugänglichere Methode der Reintegration mit dem Retinex-Algorithmus näher untersucht. Sie wird in [Finlayson *et al.*, 2002] und [Steinmetz *et al.*, 2007] beschrieben und in Kapitel 3 erläutert.

Das Schaubild in Abbildung 1 zeigt das Verfahren zur Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus.

2 Schattenkantendetektion

Die Voraussetzung für die Erzeugung des schattenfreien Grauwertbildes ist, dass die verwendete Kamera das zugrundeliegende Bildentstehungsmodell hinreichend genau realisiert. Hierfür müssen die Sensoren der Kamera möglichst schmalbandig sein und es sollte keine kamerainterne Verarbeitung der Sensorantworten stattfinden. Außerdem wird von einer planck'schen Beleuchtung der Szene ausgegangen.

2.1 Invariantes Grauwertbild

Das 3D-Farbbild wird zunächst in den 2D-Log-Chromatizitätsraum transformiert.

$$\chi_1 = \ln\left(\frac{R}{G}\right) \quad \chi_2 = \ln\left(\frac{B}{G}\right) \quad \text{für } G \neq 0$$

¹siehe Powerpoint-Präsentation „ECCVShadows.ppt“, <http://www.cs.sfu.ca/~mark/ftp/Eccv02/> (zuletzt aufgerufen am 7. Februar 2008)

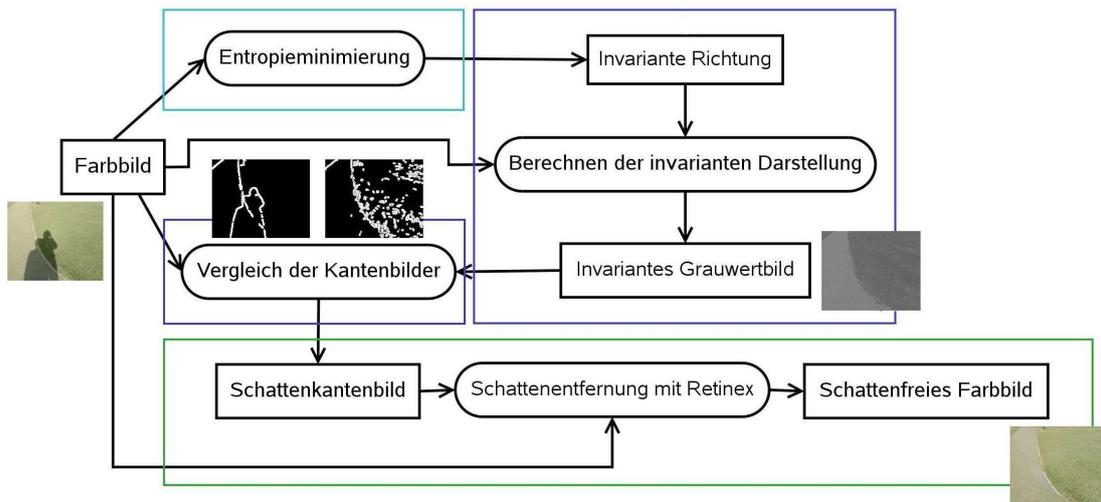


Abbildung 1: Prozesse bei der Schattenentfernung nach [Finlayson *et al.*, 2006] und [Steinmetz, 2007]

[Finlayson *et al.*, 2006] zeigen, dass ein Oberflächenpunkt (bei Verwendung des oben genannten Bildentstehungsmodells) unter verschiedenen Beleuchtungen in diesem Raum Werte erhält, die im Idealfall auf einer Geraden liegen. Die Richtung dieser Geraden (invariante Richtung) ist für eine bestimmte Kamera konstant. Die Projektion der Datenpunkte entlang der beleuchtungsinvarianten Richtung ergibt eine beleuchtungsinvariante Darstellung des Bildes. So erhält man ein Grauwertbild, das keine Schatten mehr enthält.

Abbildung 2 zeigt die Log-Chromazitätskoordinaten von 5 verschieden farbi-

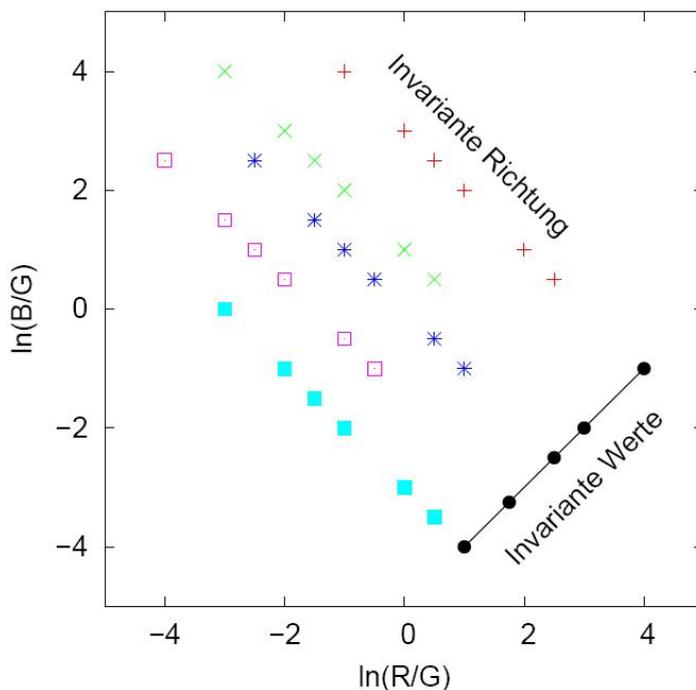


Abbildung 2: 2D-Log-Chromazitätskoordinaten und ihre Projektion aus [Steinmetz, 2007]

gen Punkten unter 6 verschiedenen Beleuchtungen (bei konstanter Kamera- und

Objektposition) und ihre Projektion auf invariante Werte. [Steinmetz, 2007] beschreibt den Aufbau genauer und bestätigt den in Abbildung 2 gezeigten Zusammenhang mit Versuchen im Labor.

Die beleuchtungsinvariante Richtung einer Kamera kann man auf verschiedene Arten erhalten. Eine Möglichkeit ist die Berechnung durch Entropieminimierung aus einem beliebigen mit der Kamera aufgenommenen Farbbild, auf dem Schatten zu sehen sind.

2.2 Entropieminimierung

Die Idee bei der Berechnung der invarianten Richtung durch Entropieminimierung nach [Finlayson *et al.*, 2004] ist, dass die Entropie bei der Projektion des Bildes entlang der korrekten invarianten Richtung minimal wird.

Abbildung 3 zeigt links die Projektion entlang der korrekten Richtung, rechts

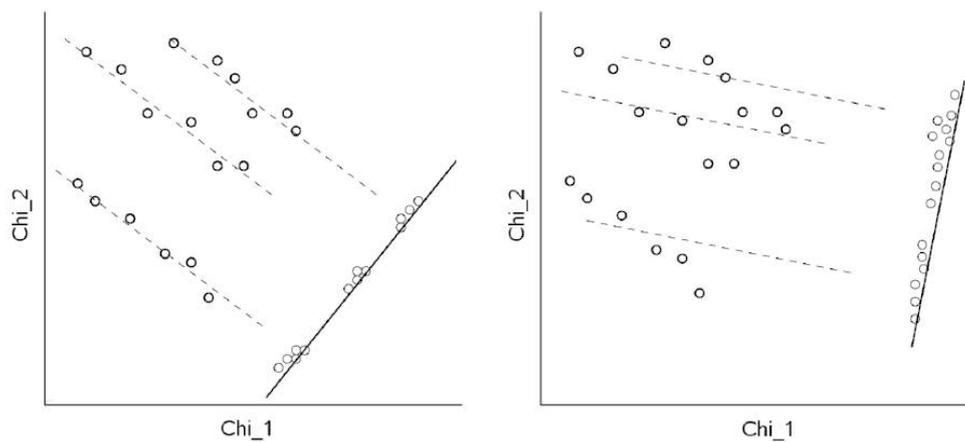


Abbildung 3: Idee der Entropieminimierung aus [Steinmetz, 2007]

die entlang einer anderen. Für jede Richtung α (0° bis 180°) wird das invariante Grauwertbild berechnet. Mit Hilfe des Histogramms wird für jedes Bild die Entropie berechnet.

$$\eta(\alpha) = - \sum_{b=1}^m p_\alpha(b) \log_2(p_\alpha(b))$$

b ist dabei ein Intervall im Histogramm und p_α die Wahrscheinlichkeit. $p_\alpha(b)$ beschreibt also in Abhängigkeit vom Winkel α die Wahrscheinlichkeit, dass ein Grauwert in dem Intervall b liegt. Der Winkel, bei dem η minimal ist, wird als invarianter Winkel für die Kamera angenommen. Trägt man die Entropie über dem Winkel auf, so ergibt sich bei [Finlayson *et al.*, 2004] die Kurve in Abbildung 4 für ein Bild. Als invarianter Winkel wurde also 156° angenommen. Eigene Ergebnisse zeigt die Abbildung 8.

2.3 Schattenkantenbild

Nachdem das invariante Grauwertbild erzeugt wurde, werden in diesem und in jedem Kanal des Eingangsfarbbildes Kanten gesucht. Dafür werden beide Bilder zunächst geglättet. Zur Kantendetektion wird in [Finlayson *et al.*, 2002] der

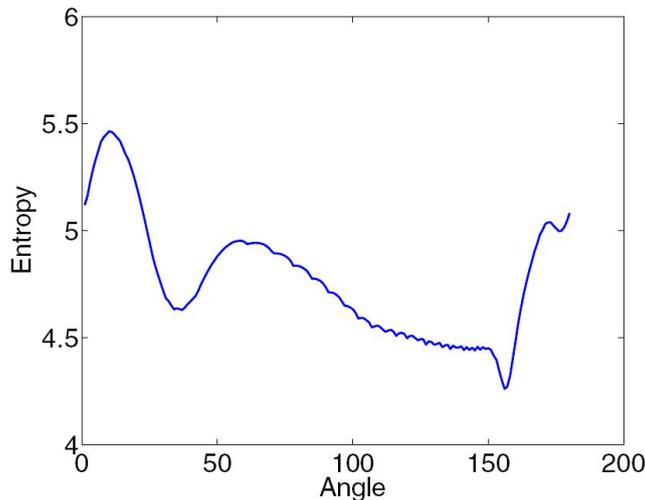


Abbildung 4: Entropie über dem Winkel aufgetragen aus [Finlayson *et al.*, 2004]

SUSAN-Algorithmus und in [Finlayson *et al.*, 2006] der Canny-Operator verwendet. Danach werden in [Finlayson *et al.*, 2002] mit einem Schwellwertoperator schwache Kanten auf Null gesetzt. In der eigenen Implementation wurde die Kantendetektion durch Bilden der Summe der Gradientenquadrate, die wie in [Drauschke *et al.*, 2006] mit der inversen Rauschvarianz gewichtet wurden, realisiert.

$$g(x, y) = \sqrt{\sum_{c=1}^3 \frac{\|\nabla f_c(x, y)\|^2}{\sigma_{nc}^2}}$$

Als Rauschvarianz σ_{nc}^2 wurde nach [Brügelmann & Förstner, 1992] der Median der Gradientenquadrate verwendet.

$$\sigma_{nc}^2 = \text{med}_{x,y}(\|\nabla f_c(x, y)\|^2)$$

Kleine Gradienten wurden dann auf null gesetzt, um zu viele kleine Kanten zu vermeiden.

Ein Pixel, das in einem der drei Kanäle des Eingangsbildes als Kantenpixel erkannt wurde (Wert größer als ein Schwellwert), nicht aber im invarianten Bild (Wert kleiner als ein Schwellwert), ist ein Schattenkantenpixel und wird im binären Schattenkantenbild S auf 1 gesetzt. Um einzelne Schattenkantenpixel und nicht zusammenhängende Schattenkanten zu vermeiden, werden die Kanten im Schattenkantenbild S zum Schluss mit der morphologischen Operation „thicken“ verbreitert.

3 Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus

3.1 Retinex-Theorie und pfadbasierter Retinex-Algorithmus

Die Retinex-Theorie nach Edwin H. Land, zitiert in [Finlayson *et al.*, 2002], stellt ursprünglich ein Modell der menschlichen Farbwahrnehmung dar. Aus Experimenten folgte Land, dass sich die Farbwahrnehmung aus dem Vergleich der Farbreize der Flächen im gesamten Sichtfeld ergibt. Für jedes Pixel werden drei

Helligkeitswerte² berechnet, die zusammen dann den Farbeindruck herstellen. Im Folgenden wird beschrieben, wie sie berechnet werden.

Den Helligkeitswert an einem Pixel erhält man durch Mittelung von Quotienten aus dem Grauwert des aktuellen Pixels und Grauwerten an verschiedenen Stellen des Bildes. Beim pfadbasierten Retinex-Algorithmus werden diese Verhältnisse entlang eines Pfades berechnet. Ausgehend von einem zufälligen Startpixel A wird in Nachbarpixel B der Wert $\frac{B}{A}$ gespeichert. Den Wert im nächsten Pixel C erhält man durch Produktbildung:

$$\frac{B}{A} \cdot \frac{C}{B} = \frac{C}{A}$$

So wird in allen Pixeln entlang des Weges das Verhältnis des aktuellen Pixels zum Startpixel A berechnet. Verfährt man so mit mehreren Pfaden, erhält man die Verhältnisse zu vielen Pixeln im Bild und kann diese mitteln um den Helligkeitswert zu erhalten. Um den Rechenaufwand zu verringern, arbeitet der Algorithmus auf logarithmierten Grauwerten, so dass Produkte zu Summen und Quotienten zu Differenzen werden. Der Helligkeitswert für den Kanal R in einem Pixel j lässt sich also nach der folgenden Formel berechnen:

$$L_R^j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Lambda_{i,j}$$

wobei $\Lambda_{i,j}$ der Helligkeitswert ist, der entlang eines Pfades \mathcal{P} , der in Pixel i beginnt und in Pixel j endet, berechnet wurde.

$$\Lambda_{i,j} = \sum_{k \in \mathcal{P}, k < j} (\log(R^{k+1}) - \log(R^k))$$

R ist hier der Rotwert des Pixels an der Stelle k bzw. $k + 1$.

3.2 Retinex zur Schattentfernung

Verwendet man den pfadbasierten Retinex-Algorithmus für die Schattentfernung, so wird angenommen, dass sich die Beleuchtung beim Eintritt in einen Schatten nicht ändert. Das Verhältnis von zwei Pixeln an einer Schattenkante wird also auf 1 gesetzt. Das Pfadprodukt wird dafür mit einem Schwellwertoperator erweitert:

$$\Lambda_{i,j} = \sum_{k \in \mathcal{P}, k < j} T_{\text{shadow}} (\log(R^{k+1}) - \log(R^k))$$

wobei T_{shadow} die folgende Schwellwertfunktion ist und S_k ist der Wert des binären Schattenkantenbildes aus Kap. 2.3 an der Stelle k :

$$T_{\text{shadow}}(x_k) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } S_k = 1 \\ x_k & \text{sonst} \end{cases}$$

Beim Austritt aus dem Schatten wird das Verhältnis auch wieder auf 1 gesetzt, also werden Bereiche außerhalb des Schattens nicht beeinflusst. Die Struktur innerhalb des Schattens bleibt durch diese Methode erhalten.

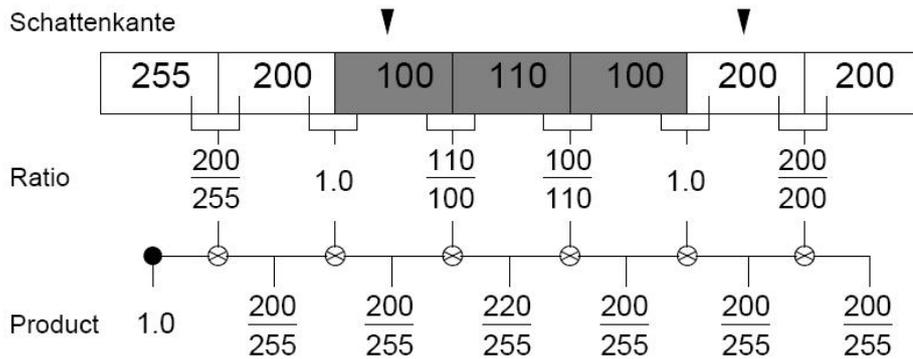
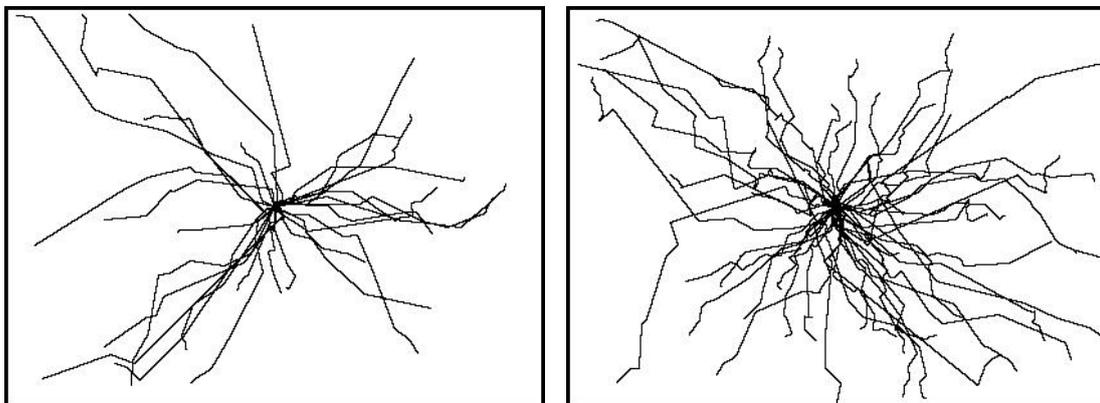


Abbildung 5: Prinzip der Schattenentfernung mit Retinex aus [Steinmetz, 2007]

Die Abbildung 5 veranschaulicht, wie ein Schatten eliminiert wird. Bei der Umsetzung nach [Finlayson *et al.*, 2002] wird am Anfang eine feste Anzahl von zufälligen Pfaden von der Bildmitte aus erzeugt. Zur Berechnung des Helligkeitswertes an einer Stelle werden die Pfade dann in das aktuelle Pixel geschoben, die Pfadprodukte berechnet und gemittelt. Anschließend werden die Pfade in das nächste Pixel geschoben und die Berechnung erneut durchgeführt. Pfade, die bei der Verschiebung aus dem Bild austreten, werden am Rand abgeschnitten und starten vom Rand des Bildes. Die Abbildung 6 zeigt zwei Bilder mit Pfaden, die nach



(a) 30 Pfade, Rekursionstiefe 4

(b) 50 Pfade, Rekursionstiefe 5

Abbildung 6: Erzeugung der Pfade von der Bildmitte aus.

dem Prinzip der Brown'schen Bewegung rekursiv und zufällig erzeugt wurden. Das genaue Verfahren wird in [Finlayson *et al.*, 2002] beschrieben.

4 Implementierung

Bei der eigenen Implementierung wurden im Wesentlichen drei Programme in Matlab geschrieben.

- Das Programm **invariantGray.m** erstellt ein beleuchtungsinvariantes Grauwertbild aus einem Farbbild.

²Land bezeichnet sie als „lightness numbers“ und meint damit die biologisch wahrgenommene Reflektanz, [Finlayson *et al.*, 2002] schreiben „lightness values“

- Die Funktion **shadowEdges.m** erzeugt aus einem gegebenen Farbbild mit Schatten und dem zugehörigen beleuchtungsinvarianten Grauwertbild ein binäres Schattenkantenbild.
- Das Programm **removeShadowsRet.m** erstellt aus einem Farbbild und einem Binärbild mit den Schattenkanten nach dem Retinex-Algorithmus ein schattenfreies Farbbild. Es gliedert sich in mehrere Unterfunktionen. Die Aufrufhierarchie ist in Abbildung 7 dargestellt.

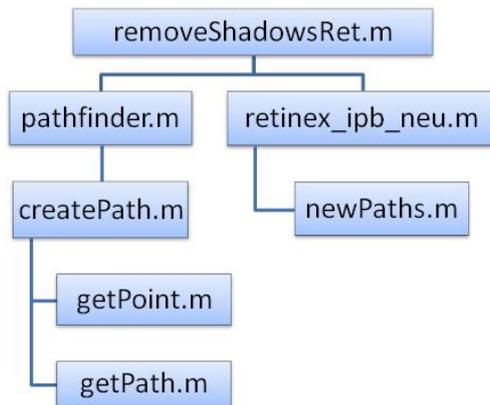


Abbildung 7: Programmstruktur der Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus

Die Funktionsweise, sowie die Ein- und Ausgabeparameter der einzelnen Teilprogramme werden jeweils im Kopf der m-Files erläutert.

5 Ergebnisse

Sowohl bei [Steinmetz, 2007] als auch bei der eigenen Implementierung gab es Probleme bei der Berechnung des invarianten Winkels durch Entropieminimierung. In Abbildung 8 wurde für vier Testbilder die berechnete Entropie über dem jeweiligen Winkel aufgetragen. Auffällig sind die drei Peaks bei 30° , 90° und 150° . Sie treten bei jedem Bild (auch von verschiedenen Kameras) auf. Daher wird nicht von einem Problem bei der verwendeten Kamera (bei allen Testbildern eine Canon Digital IXUS 50) ausgegangen, sondern von einem Fehler im Programm.

Bei [Steinmetz, 2007] ergibt sich das Problem, dass der invariante Winkel bei verschiedenen Bildern sehr stark variiert, obwohl der für eine Kamera konstant sein sollte. Dies konnte allerdings nicht bestätigt werden. Entfernt man mit einem Medianfilter die drei Peaks und bestimmt das Minimum, so ergibt sich für die benutzte Kamera für verschiedene Bilder ein Winkel zwischen 110° und 120° . Trotzdem sind die damit erzeugten invarianten Grauwertbilder zum Teil nicht überzeugend.

[Steinmetz, 2007] stellte bei der Kalibrierung der Kamera mit einem Macbeth ColorChecker[®] fest, dass Punkte verschiedener chromatischer Farbfelder teilweise auf derselben Gerade liegen, so dass sich im invarianten Grauwertbild auf denselben Wert abgebildet werden. Außerdem können nicht bekannte kamerainterne

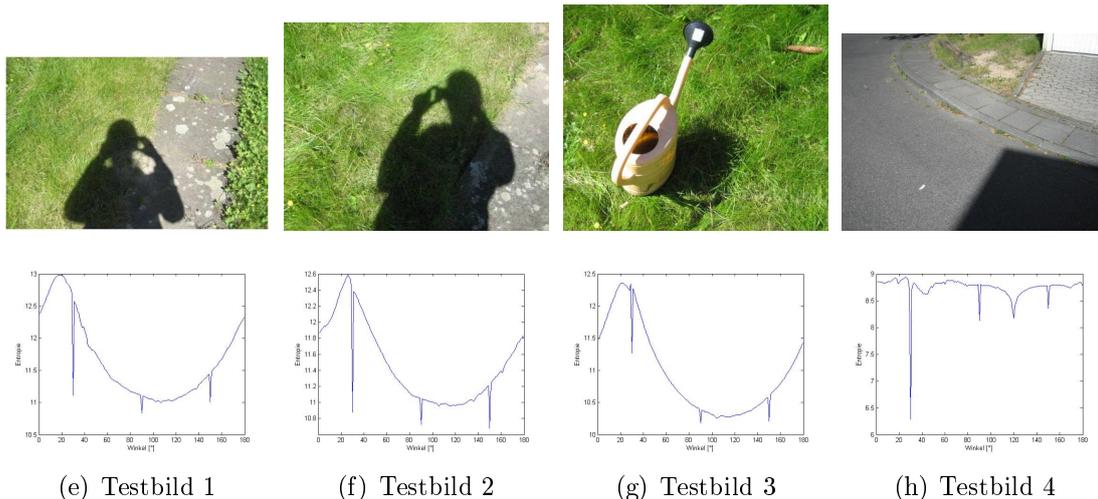


Abbildung 8: Entropie über Winkel aufgetragen

Verarbeitungsschritte zu einer schlechten Bestimmung des invarianten Grauwertbildes führen. In Abbildung 9 ist das Testbild 1 mit dem zugehörigen invarianten Grauwertbild und dem damit erzeugten Schattenkantenbild dargestellt.

Bei der Schattenentfernung nach [Finlayson *et al.*, 2006] ist die automatische

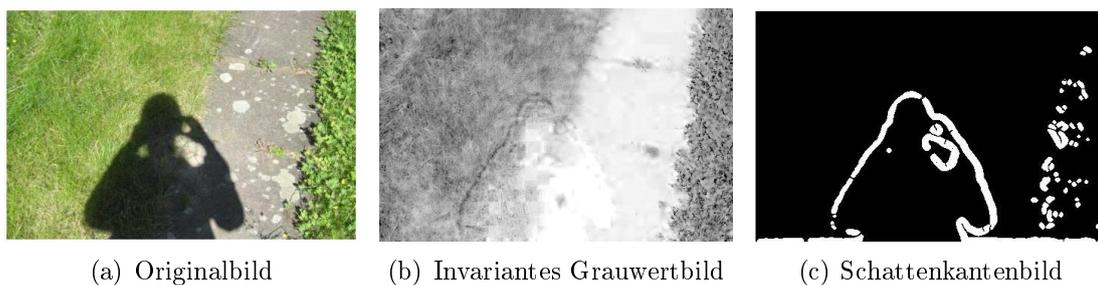


Abbildung 9: Ergebnisse für Testbild 1

Schattenkantendetektion die anspruchsvollste Aufgabe. [Finlayson *et al.*, 2006] probierten dabei selbst verschiedene Methoden aus und verbesserten im Laufe der Jahre ihre Detektion, siehe auch [Finlayson *et al.*, 2002].

Lücken in der Schattenkante führen dazu, dass sie an diesen Stellen nicht entfernt wird. Außerdem wird bei der Anwendung des Retinex-Algorithmus durch Pfade, die die nicht erfasste Schattenkante kreuzen, der Schatten in den schattenfreien Bereich des Bildes hinein getragen. Im Ergebnis erhält man den Eindruck, dass der Schatten „verschmiert“ wurde. Falsch klassifizierte Schattenkantenpixel erzeugen Artefakte im Bild. Die Detektion der Schattenkanten muss also möglichst exakt sein, um gute Ergebnisse zu erhalten.

Bei eigenen Versuchen mit verschiedenen Bildern mussten die Schwellwerte, die zur Klassifikation eines Pixels als Schattenkantenpixel führen, jedes Mal verändert werden, um zufriedenstellende Schattenkantenbilder zu erhalten. Da ein gutes Schattenkantenbild essentiell ist für ein gutes Ergebnis beim Retinex-Algorithmus, wurden bei den Tests des Retinex-Algorithmus oft per Hand verbesserte oder erstellte Schattenkantenbilder verwendet. Ein zusätzliches Problem bei der Schattenkantendetektion liegt darin, dass nur Schattenkanten erfasst werden können, die nicht mit einer Materialkante zusammen fallen. [Steinmetz *et al.*, 2007] lie-

ferten hierfür einen Ansatz über die Einbeziehung des Hue-Kanals des Bildes im HSV-Farbraum, der allerdings hier nicht weiter verfolgt wurde.

Weitere Einschränkungen bei der Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus nach [Finlayson *et al.*, 2002] werden im Folgenden genannt:

- Es können nur Schlagschatten mit scharfen Kanten entfernt werden. Die Schattenkante im binären Schattenkantenbild muss den gesamten Übergangsbereich von Schatten zu Nichtschatten abdecken. Allerdings geht bei der Reintegration die Struktur des Bildes im Bereich der Schattenkante verloren, so dass im schattenfreien Bild die früheren Schattenkanten unnatürlich glatt aussehen. Ist die Schattenkante also zu dick, fällt dies im Ergebnis auf.
- Der Schatten muss von klaren und einfachen Kanten begrenzt werden. Ist die Schattenkante nicht klar definiert, kommt es zu Problemen bei der Schattenkantendetektion.
- Schatten am Rand oder im Eckbereich des Bildes werden schlecht entfernt. Hier tragen zur Mittelbildung viele Pfade bei, die im Schatten starten, die Schattenkante nicht kreuzen und damit den Lightnesswert bei der Mittelbildung nicht sehr aufhellen. Aus demselben Grund darf der Schatten auch nicht einen zu großen Teil des Bildes einnehmen.

Abbildung 10 und 11 zeigen ein von [Finlayson *et al.*, 2002] veröffentlichtes Ergebnis und ein eigenes. Zum Vergleich wird auch das mit demselben Testbild erzielte Ergebnis von Steinmetz gezeigt. Die deutlichen Qualitätsunterschiede resultieren wahrscheinlich daraus, dass die verwendete Kamera nicht den Forderungen des Verfahrens entspricht.



(a) Originalbild

(b) Schattenfreies Bild

Abbildung 10: Ein Bild vor und nach der Schattenentfernung aus [Finlayson *et al.*, 2002]

Literatur

[Brügelmann & Förstner, 1992] BRÜGELMANN, REGINE, & FÖRSTNER, WOLFGANG. 1992. Noise Estimation for Color Edge Extraction. *Pages 90–107 of:*



Abbildung 11: Testbild 1 vor und nach der Schattentfernung

FÖRSTNER, W., & RUWIEDEL, S. (eds), *Robust Computer Vision*. Wichmann, Karlsruhe.

[Drauschke *et al.*, 2006] DRAUSCHKE, MARTIN, SCHUSTER, HANNS-FLORIAN, & FÖRSTNER, WOLFGANG. 2006. Detectability of Buildings in Aerial Images over Scale Space. *Pages 7–12 of: FÖRSTNER, WOLFGANG, & STEFFEN, RICHARD (eds), Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision*, vol. XXXVI. Bonn: ISPRS Commission III, for ISPRS.

[Finlayson *et al.*, 2002] FINLAYSON, GRAHAM D., HORDLEY, STEVE D., & DREW, MARK S. 2002. Removing Shadows from Images using Retinex. *Pages 73–79 of: Proceedings of the IS&T/SID Tenth Color Image Conference: Color Science and Engineering System Technology*. Society for Information Display.

[Finlayson *et al.*, 2004] FINLAYSON, GRAHAM D., DREW, MARK S., & LU, CHENG. 2004. Intrinsic Images by Entropy Minimization. *Pages 582–595 of: PAJDLA, TOM, & MATAS, JIRI (eds), Proceedings of European Conference on Computer Vision 2004*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3023.

[Finlayson *et al.*, 2006] FINLAYSON, GRAHAM D., HORDLEY, STEVEN D., LU, CHENG, & DREW, MARK S. 2006. On the Removal of Shadows from Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **28**(1), 59–68.

[Steinmetz, 2007] STEINMETZ, SARAH. 2007 (November). *Schattentfernung in Bildserien unter Verwendung des Retinex-Algorithmus*. Diplomarbeit, Universität Koblenz-Landau, Koblenz.

[Steinmetz *et al.*, 2007] STEINMETZ, SARAH, PAULUS, DIETRICH, & HANS, WOLFRAM. 2007 (Oktober). Schattentfernung unter Verwendung des Retinex-Algorithmus. *Pages 93–104 of: HANS, WOLFRAM, DROEGE, DETLEV, & PAULUS, DIETRICH (eds), 13. Workshop Farbbildverarbeitung*.

[Weiss, 2001] WEISS, YAIR. 2001 (July). Deriving Intrinsic Images from Image Sequences. *Pages 68–75 of: Proceedings of the 8th International Conference on Computer Vision 2001*, vol. II.