



ulm university universität  
**uulm**

# 3D Unsharp Masking

Christoph Röβing

16. Juni 2011



# 3D Unsharp Masking

Christoph Rößing

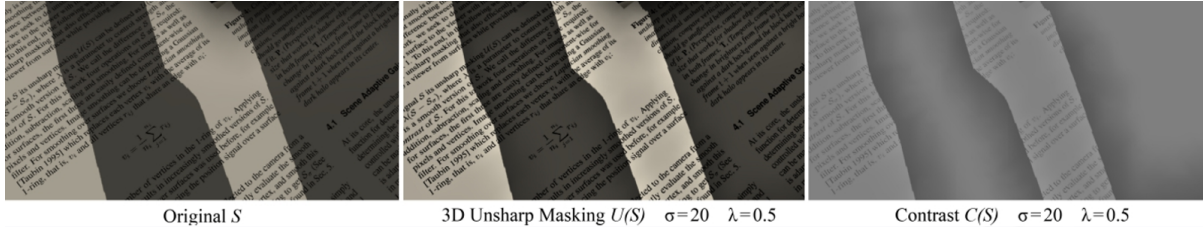


Abbildung 1: Von links nach rechts: Original, 3D Unsharp Masking und Kontrastsignal [Rit08]

## 1 Einleitung

Diese Ausarbeitung behandelt die Erweiterung des bekannten 2D Unsharp Maskings (USM) in den dreidimensionalen Raum. Dazu wird das „3D Unsharp Masking“ von Ritschel et al. [Rit08] und seine Wirkung auf das menschliche visuelle System (MVS) betrachtet. Zum Vergleich wird neben dem 2D USM auch das „Unsharp Masking of the Depth Buffer“ von Luft et al. [LCD06] heran gezogen. Mit Verweis auf die Arbeit von Purves und Lotto [PSL99], wird genauer auf die auftretenden Kontrastprofile und ihre Wirkung auf das MVS eingegangen. Die zweidimensionalen Ausgabebilder des 3D USM erscheinen bezüglich ihrer Schärfe und Plastizität deutlich verbessert. Diese Verbesserung ist nicht nur subjektiv, sondern auch objektiv mittels einer Probandenstudie von Ihrke et al. [IRS<sup>+</sup>09] belegt.

## 2 Algorithmus

### 2D Unsharp Masking

2D USM ist eine Technik zur lokalen Kontrasterhöhung, die man in vielen gängigen Bildverarbeitungsprogrammen findet. Die Kontrasterhöhung erfolgt über eine Verstärkung der hohen Frequenzanteile innerhalb des Bildes. Zur Ermittlung des hochfrequenten Bildanteils bzw. des Kontrastsignals  $C(S)$  wird zunächst das Eingangssignal  $S$  mit einem Gaussfilter der Weite  $\sigma$  weichgezeichnet. Dieses weichgezeichnete Bild  $W(S)$  wird dann von  $S$  abgezogen. Das resultierende Kontrastsignal  $C(S)$  ist somit Vorzeichen behaftet und wird abschließend mit dem Faktor  $\lambda$  gewichtet auf das Eingangssignal  $S$  addiert. Dieses Verfahren verstärkt lokale Kontrastprofile und führt zu einer gesteigerten

Schärfewahrnehmung.

Jedoch generiert der Algorithmus für hohe Werte von  $\lambda$  Übersättigungen und Farbbränder im Ausgabebild  $U$ . Um diese Artefakte zu vermeiden, wird das USM häufig in einem perceptiven Farbraum (z.B. CIELAB) nur auf dem Luminanzkanal angewandt. Dadurch wird die Entstehung von Farbarte-fakten vermieden und nur die lokale wahrgenommene Luminanz, nicht jedoch die Farbwerte beeinflusst.

### 3D Unsharp Masking

Um eine Artefaktbildung auch bei höheren Werten für  $\lambda$  zu vermeiden, wurde der Algorithmus in den dreidimensionalen Raum erweitert. Dabei bleiben die grundlegenden Einzelschritte gleich des 2D USM erhalten.

Jedoch dient als Eingangssignal  $S$  nunmehr nicht die Bildebene der Kamera, sondern direkt das von der Oberfläche des Drahtgitter-Modells zu Kamera reflektierte Licht. Dementsprechend wird auch die Generierung des Kontrastsignals  $C(S)$  in 3D durchgeführt. Dazu wird zunächst die von dem Drahtgitter-Modell ausgehende Radianz einer Laplace-Glättung unterzogen: Der lokale Intensitätswert eines Knotens  $v_i$  wird durch den Mittelwert der Nachbarn  $r_i$  ersetzt.

$$v_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} r_{i,j}$$

Der Parameter  $\sigma$  beschreibt die Anzahl der Iterationen und somit die Filterweite. Das Kontrastsignal  $C(S)$  ergibt sich aus der Differenz von der weichgezeichneten Radianz  $W$  und der Eingangsradianz  $S$ . Dieser hochfrequente Anteil  $C(S)$  wird auf  $S$ , gewichtet mit dem Parameter  $\lambda$ , aufaddiert. Der

Parameter  $\lambda$  ist adaptiv und passt sich an die lokale Varianz der Luminanzwerte auf dem Drahtgitter an.

$$\lambda_{Adapt} = \lambda \sqrt{1 + \text{Var}(S)}$$

Dies vermindert die Kontrastanhebung auf schwach texturierten und verstärkt den Effekt auf stark texturierten Oberflächen. Um Farbartefakte zu vermeiden, wird der gesamte Algorithmus ausschließlich auf den Luminanzkanal im CIELAB Farbraum angewandt. Durch die Normalisierung der Farbk채n채le mit  $k = U(s)_{L^*}/S_{L^*}$  bleibt die S채ttigung konstant.

$$U(S)_{LAB} = [S_{L^*} + \lambda_{Adapt} C(S)_{L^*}, kS_{a^*}, kS_{b^*}]$$

Somit generiert das 3D USM ein gesch채rftes Ausgabebild mit einer verminderten Tendenz zur Artefaktbildung.

### 3 Ergebnisse

#### Cornsweet effekt

Generiert man zwischen zwei gleichfarbigen Fl채chen ein sog. Cornsweet Profil (siehe Abbildung 2), so nimmt das MVS einen nicht vorhandenen Helligkeitsunterschied zwischen den zwei gleichfarbigen Regionen wahr. Dieser Cornsweet Effekt tritt in einem r채umlich korrekten Kontext noch st채rker auf. Untersucht wird dies in der Arbeit von Purves und Lotto [PSL99], die davon ausgehen, dass unser MVS darauf trainiert ist, solche Gradienten einem natőrlichen Ursprung der Beleuchtung zuzuordnen. Dementsprechend nimmt der Effekt ab, wenn das dargestellte Profil nicht koh채rent zu der Szenenbeleuchtung dargestellt wird.

3D USM főrht solche Cornsweet Profile perspektivisch korrekt in das Bild ein und erhۆht somit den wahrgenommenen Kontrast. In der Abbildung 1 wirkt der Schatten őrber dem Text dunkler als im Original. Bei Betrachtung des Kontrastsignals wird jedoch ersichtlich, dass im Zentrum des Schattens keine Verdunkelung stattgefunden hat: Die Schrift bleibt lesbar, obwohl die Region dunkler erscheint. 3D USM ermۆglicht somit die Verst채rkung von Kontrasten őrber dem physisch darstellbaren Bereich hinaus.

#### R채umliche Wahrnehmung

Das menschliche visuelle System (MVS) nutzt Glanzlichter und Schattierungen, um die r채umliche

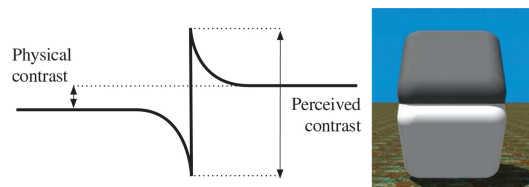


Abbildung 2: Cornsweet Profil und 3D-Cornsweet-Effekt [Rit08]

Anordnung in einem zweidimensionalen Bild besser zu erfassen. Da 3D USM genau diese Beleuchtungseffekte intensiviert, kann unser MVS die Tiefe und Struktur innerhalb des Bildes besser wahrnehmen (siehe Abbildung 3).

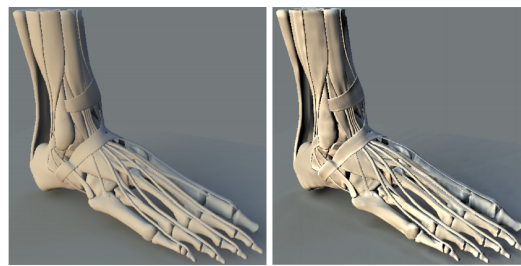


Abbildung 3: Links Original, rechts 3D USM [Rit08]

#### Lokal adaptive Verst채rkung

Auch bei der dreidimensionalen Erweiterung des USM kommt es an hochfrequenten (Schatten-) Kanten auf planaren Fl채chen zu einem sichtbaren Lichtschleier. Dieser wird in einer stark texturierten Umgebung weniger deutlich wahrgenommen. Die lokal adaptive Verst채rkung  $\lambda_{Adapt}$  berőrksichtigt diesen Wahrnehmungseffekt, indem sie von der textuellen Varianz in der Umgebung des Knotens auf dem Drahtgitter gesteuert wird. Das Ergebnis l채sst sich in der Abbildung 1 betrachten: Der Lichtschleier um die Schattenkante in Regionen mit Text ist breiter, als in Regionen ohne Text und f채llt daher weniger deutlich auf.

### 4 Vergleich

#### 2D vs. 3D Unsharp Masking

Im Gegensatz zum 2D USM operiert die 3D-Erweiterung direkt auf dem Drahtgitter-Modell der Szene. Dadurch liefert der Algorithmus bei der

Rückprojektion in die Bildebene, perspektivisch kohärente Ergebnisse. Demnach verschmälert sich der im Bild eingeführte Kontrast mit wachsender Distanz, was der Erfahrung des MVS entspricht und somit realistischere Bilder erzeugt.

Auch die temporale Kohärenz ist durch dieses Verfahren sichergestellt: Während sich im 2D Fall bei wechselndem Hintergrund die Kontrastkanten auf dem Vordergrundobjekten ändert, erfolgt die Kontrastanhebung im 3D Fall unabhängig vom Hintergrund.

### Vergleich zu „USM the Depth-Buffer“

Ein verwandtes Verfahren zur Erweiterung des Unsharp Masking in die dritte Dimension wurde von Luft et al. [LCD06] vorgeschlagen. Dieser USM Algorithmus nutzt als Eingangssignal eine zu dem Bild zugehörige Tiefenkarte, aus der das Kontrastsignal gewonnen wird. Dieses wird, analog zum 2D USM, gewichtet und mit dem Eingangssignal addiert. Im Ausgangsbild werden somit künstliche Helligkeits-Kontraste an Tiefengradienten erzeugt. Auf große Gradienten reagiert der Algorithmus empfindlich und neigt zu Lichtschleier-Artefakten. Ebenso beachtet er, im Gegensatz zu 3D USM, in planaren Bereichen Glanzlichter und Schattierungen nicht. Somit wird für das MVS die räumliche Anordnung zwar deutlicher, jedoch werden Beleuchtungseffekte nur teilweise verstärkt.

Ein weiterer Nachteil von „USM the Depth-Buffer“ ist die fehlende Einbeziehung von verdeckten Objekten. Dies beeinträchtigt die temporale Kohärenz, da Objekte die bei Kamerасhwenks aus der Verdeckung auftauchen, vorher keinen Einfluss auf die Behandlung der Objekte im Vordergrund haben. Das führt, ähnlich wie beim 2D USM, im schlimmsten Fall zu einem Flackern auf Vordergrundobjekten, wenn sich der Tiefengradient zum Hintergrund schnell verändert.

Der klare Vorteil von „USM the Depth-Buffer“ ist jedoch, dass kein Drahtgitter-Modell, sondern nur eine Tiefenkarte benötigt wird. Daher kann dieses Verfahren nicht nur auf gerenderte Szenen, sondern auch auf Fotos mit Tiefeninformation angewendet werden.

## 5 Evaluation des 3D Unsharp Maskings

Um eine Verbesserung durch 3D USM im Vergleich zum Originalbild zu belegen, hat Ihrke et al. in „A perceptual evaluation of 3D un-

sharp masking“ [IRS<sup>+</sup>09] den Algorithmus in einer Probanden-Studie evaluiert. Zudem wurde der Einfluss der Parameter  $\lambda$  und  $\sigma$  bestimmt. Die Studie wurde als 4 x 3 „within-subject“ Studie (4 Szenen x 3 Ausprägungen von  $\sigma$  bei mehreren Messungen von  $\lambda$  mit einer Versuchsperson) ausgelegt. Der Parameter  $\lambda$  wurde jeweils als unabhängiger Faktor mittels der „Methode der Anpassung“ bestimmt.

### Durchführung

Im Testsetup stellte man jeweils zwei Stimuli mit der gleichen Szene nebeneinander dar. Ein Stimulus wurde dabei jeweils mit dem 3D USM bearbeitet. Der Parameter  $\lambda$  konnte von den Teilnehmern mit Tastendrücken verändert werden, während zwischen den abgeänderten Bildern für 300ms eine weichgezeichnete Version des Originalbildes eingefügt wurde. Dadurch wurde vermieden, dass Teilnehmer zwischen einzelnen bearbeiteten Bildern und nicht zwischen Original und bearbeitetem Bild vergleichen konnten. Jeder Proband musste für jede der vier Szenen jeweils drei Aufgaben erfüllen: Zunächst sollte  $\lambda_{jn}$ , eine gerade wahrnehmbare Veränderung im Vergleich zum Original und anschließend  $\lambda_{obj}$ , die Schwelle bei der gerade noch keine Artefakte im Bild auftreten, bestimmt werden. Zur Verifizierung des Parameterraumes sollte von den Probanden zuletzt  $\lambda_{best}$ , der Wert mit der am besten empfundenen Darstellung, eingestellt werden. Um die Konfidenz der ermittelten Werte zu bestimmen, musste jeder Proband jede Aufgabe zweimal bearbeiten.

### Auswertung

Um zu belegen, dass bearbeitete Bilder vorgezogen werden, musste nachgewiesen werden, dass der bevorzugte Wert ( $\lambda_{best}$ ) über dem Wert der Wahrnehmbarkeit des Effektes liegt ( $\lambda_{jn}$ ). Bei einer sinnvollen Wahl des Parameterraumes muss auch die Schwelle, ab der sichtbare Artefakte auftreten, ( $\lambda_{obj}$ ) über ( $\lambda_{best}$ ) liegen.

Dazu wurde zunächst die Verlässlichkeit und Konsistenz der Ergebnisse geprüft. Dies wurde mittels der intra-rater Korrelation zwischen zwei gleichen Aufgaben für jeden Probanden ermittelt. Da diese für alle Probanden sehr hoch war (alle  $r > 0.75$ ), wurde der Mittelwert beider Messungen für die weitere Auswertung genutzt. Ebenso wurden alle Ausreißer, die außerhalb der doppelten Standardabweichung lagen, durch den Mittelwert der verbleiben-

den Ergebnisse ersetzt (5% der Daten).

Um die eingangs aufgestellten Hypothesen abzu-  
prüfen, wurden zunächst der Einfluss von den un-  
abhängigen Faktoren  $\sigma$  und der gestellten Aufgabe  
sowie deren Wechselwirkung auf die unabhängige  
Variable  $\lambda$  ermittelt. Da zu erwarten war, dass die  
Werte für  $\lambda$  in jeder Szene unterschiedlich skalieren,  
wurden jeweils separat zweifaktorielle Varianzana-  
lysen (ANOVA) durchgeführt.

Es ergab sich dabei für alle Szenen ein starker Ein-  
fluss ( $p < .001$ ) auf  $\lambda$  bezüglich der Aufgaben-  
stellung. Lediglich bei zwei Szenen ergab sich ein  
zusätzlicher Einfluss von  $\sigma$  sowie der Wechselwir-  
kung von  $\sigma$  und der gestellten Aufgabe bezüglich  
der Wahl der Probanden für  $\lambda$ . Auffällig war hier,  
dass nur in Szenen mit vielen feingranularen räum-  
lichen Strukturen die Filterweite  $\sigma$  einen Einfluss  
auf die Wahl der drei Ausprägungen von  $\lambda$  hatte.

Mittels angepassten paarweisen Kontrasten nach  
Holm [Hol79] konnte die eingangs formulierte These  
nachgewiesen werden, dass  $\lambda_{best} > \lambda_{jn}$  und  $\lambda_{obj} >$   
 $\lambda_{best}$  gilt ( $p < 0.08$ ). Um eine grobe Aussage für die  
Parametrierung von  $\lambda$  zu erhalten, wurden alle Mit-  
telwerte auf  $\lambda_{jn}$  normiert. Dabei ergaben sich die  
Abhängigkeiten zu:  $\lambda_{best} \approx 2\lambda_{jn}$  und  $\lambda_{obj} \approx 4\lambda_{jn}$ .  
Daraus lässt sich schließen, dass 3D USM eine Bild-  
verbesserung darstellt und dass ein sinnvoller Para-  
meterraum, abhängig von der Wahrnehmbarkeits-  
Grenze  $\lambda_{jn}$ , aufgespannt werden kann.

## 6 Zusammenfassung

Das 3D USM verringert typische Artefakte des 2D  
USM wie Lichtschleier, Abhängigkeit von Struktu-  
ren im Hintergrund und temporale Inkonsistenzen.  
Die Berücksichtigung der Empfindlichkeit des MVS  
für Lichtschleier in schwach texturierten Bildbe-  
reichen, sowie die perspektivisch korrekte Darstel-  
lung, erlaubt stärkere Kontrastanhebung als mit 2D  
USM oder „USM the Depth Buffer“. Der Algorith-  
mus beschränkt sich dabei weitestgehend auf Be-  
leuchtungseffekte, die das MVS nutzt, um räum-  
liche Strukturen in zweidimensionalen Darstellun-  
gen zu erkennen. Dies erhöht die Plastizität und  
die empfundene Schärfe der Darstellung. Mittels  
Cornsweet Profilen können die dabei erzeugten  
Kontraste sogar über das physisch dargestellte Ni-  
veau angehoben werden.

Dementsprechend werden die Ergebnisse des 3D  
USM von allen Probanden der Studie [IRS<sup>+</sup>09] dem

Original vorgezogen. Gleichwohl wären weitere Un-  
tersuchungen wünschenswert, die eine Überlegen-  
heit von 3D USM vor anderen Unsharp Masking  
Algorithmen belegt. Auch der Zugewinn durch den  
verbesserten räumlichen Eindruck könnte man mit  
einer Studie genauer untersuchen.

Prinzipbedingt beschränkt sich der Algorithmus  
auf Szenen mit vorhandenen Drahtgitter-Modellen,  
während die anderen hier vorgestellten Verfah-  
ren keine weiteren bzw. lediglich Tiefeninformatio-  
nen benötigen. Zudem stellt 3D USM hohe An-  
forderungen an die Regelmäßigkeit des Drahtgiter-  
ters, da es ansonsten schnell zu Artefakten und  
perspektivischen Fehlern kommen kann. Auch ist  
die Vermeidung von Lichtschleiern an Tiefenkan-  
ten nicht immer von Vorteil. Die Ergebnisse von  
Luft et al. [LCD06] zeigen eindrucklich, dass gerade  
dort starke Kontraste zu einer besseren räumli-  
chen Wahrnehmung führen können. Somit könnte  
vielleicht eine Kombination beider Verfahren einen  
noch plastischeren Tiefen-Eindruck erzeugen.

## Literatur

- [Hol79] S Holm. A simple sequentially rejective  
multiple test procedure. *Scandinavian  
Journal of Statistics*, 6(2):65–70, 1979.
- [IRS<sup>+</sup>09] Matthias Ihrke, Tobias Ritschel, Ka-  
leigh Smith, Thorsten Grosch, Ka-  
rol Myszkowski, and Hans-Peter Sei-  
del. A perceptual evaluation of 3D un-  
sharp masking. *Proceedings of SPIE*,  
49(0):72400R–72400R–12, 2009.
- [LCD06] Thomas Luft, Carsten Colditz, and Oli-  
ver Deussen. Image enhancement by un-  
sharp masking the depth buffer. *ACM  
Transactions on Graphics*, 25(3):1206,  
July 2006.
- [PSL99] D Purves, A Shimpi, and R B Lotto.  
An empirical explanation of the corns-  
weet effect. *Journal of Neuroscience*,  
19(19):8542–8551, 1999.
- [Rit08] Tobias Ritschel. 3D unsharp masking  
for scene coherent enhancement. *ACM  
Transactions on Graphics*, 27(3):1, Au-  
gust 2008.