

Computational Imaging: Optimale Synthese von Optik und Bildverarbeitung

Bernd Jähne

Heidelberg Collaboratory for Image Processing (HCI)
am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen
der Universität Heidelberg
`Bernd.Jaehne@iwr.uni-heidelberg.de`

72. Heidelberger Bildverarbeitungsforum, Mainz, 02. Juli 2019

Das Material wird ausschließlich den Teilnehmern des Bildverarbeitungsforum übergeben und darf nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors an Dritte weitergegeben werden.

Gliederung

I Was ist Computational Imaging?

II Warum Computational Imaging?

III Erfolgreiche Beispiele

IV Zukunftsperspektiven

I Was ist Computational Imaging?

Definition Computational Imaging

Synthese aus Bildaufnahme und Bildauswertung

Traditionales Verständnis

- Optik erzeugt Bild
- Bildauswertung analysiert Inhalte

Computational Imaging

- Bild entsteht erst *nach* Aufnahme- und Auswertetechnik (Indirekte Bildgebung)

Klassisches Beispiel: 3D-Computertomografie

- In einem Röntgenbild sind Informationen aus allen Tiefen überlagert

II Warum Computational Imaging?

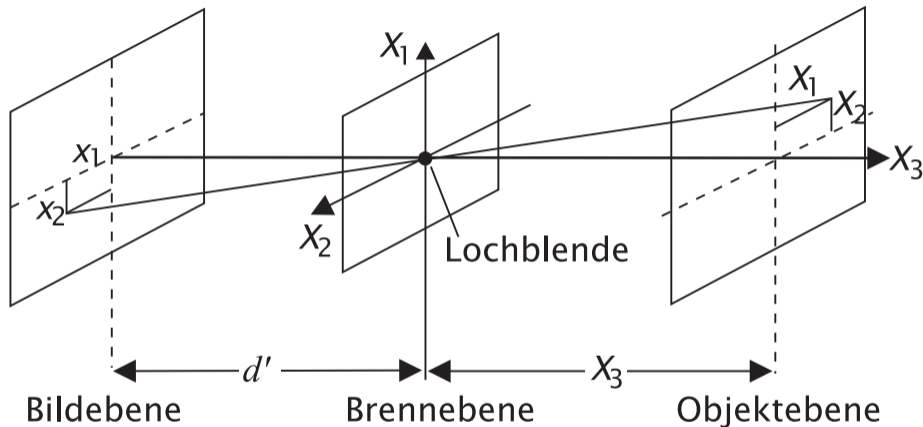
Zielsetzung Computational Imaging

Überwindung der Grenzen

traditioneller optischen Abbildung

bezüglich Geometrie und Radiometrie

Perspektivische Abbildung: Verlust der dritten Dimension



Strahlensatz:

$$\frac{x}{z} = \frac{x'}{d'}, \quad \frac{y}{z} = \frac{y'}{d'}$$

Geometrie der perspektivische optischen Abbildung

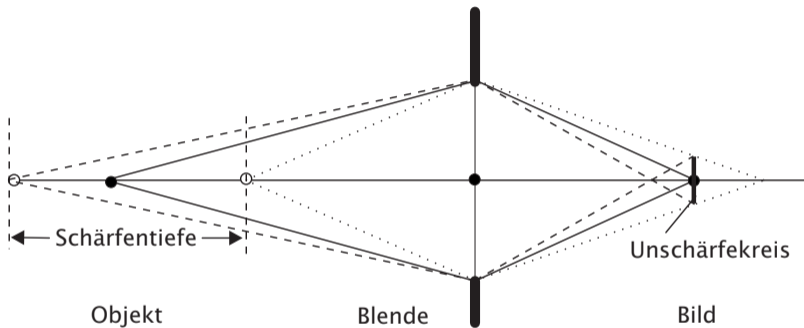
Berechnung der 2D-Bildkoordinaten aus den 3D-Weltkoordinaten:

$$\boxed{x' = \frac{d'x}{z}, \quad y' = \frac{d'y}{z}.} \quad (1)$$

Eigenschaften:

- ① Absolute Entfernung unbekannt
- ② Gegenstandsgröße unbekannt
- ③ Neigung von Oberflächen im Raum unbekannt
- ④ Volumetrische Objekte prinzipiell nicht erkennbar

Limitierte Schärfentiefe



Verschiebung $\pm \Delta z$ der Gegenstandsebene mit Unschärfekreisdurchmesser $< u'$ auf der Bildebene

Hohe Tiefenschärfe bedeutet wenig Licht!

Limitierte Schärfentiefe

Berechnet sich nach Jähne [2005] zu

$$\Delta z \approx \pm n_f \cdot \frac{1 + m_l}{m_l^2} u' \quad (2)$$

mit *Blendenzahl*, Durchmesser der Blende a

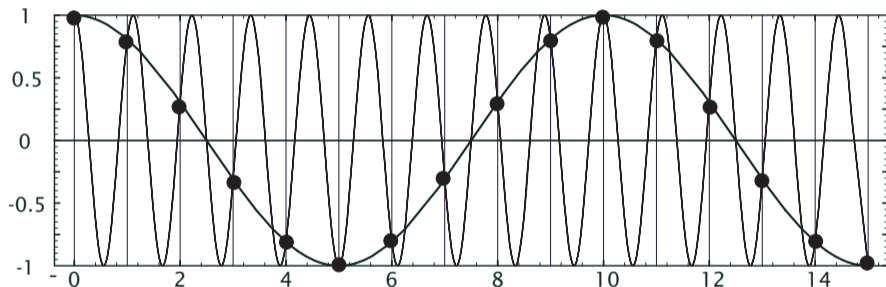
$$n_f = \frac{f}{a} \quad (3)$$

und Abbildungsmaßstab

$$m_l = \frac{x}{X} \quad (4)$$

Limitierte Auflösung I

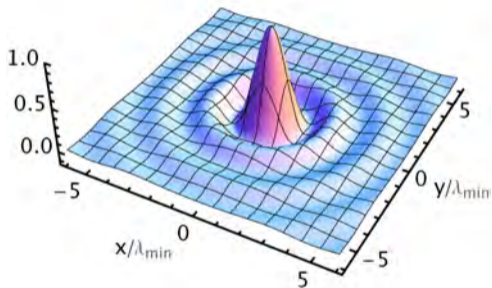
Überwindung der Limitierung durch das Abtasttheorem?



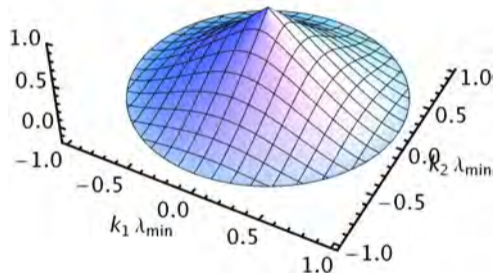
Besagt: jede periodische Struktur muss mindestens zweimal pro Wellenlänge abgetastet werden.

Limitierte Auflösung II

Überwindung der Abbeschen Auflösungsgrenze?



Beugungsscheibchen (PSF)



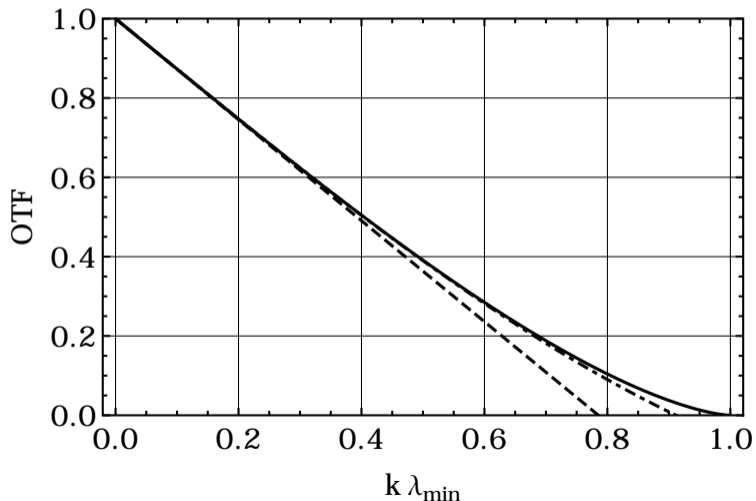
Optische Transferfunktion (OTF)

Minimal auflösbare Struktur $\lambda_{\min} = n_f \lambda$

Große Blendenzahl $n_f =$ Hohe Tiefenschärfe = geringe Auflösung

Beugung an Blendenöffnung: OTF

Kreisblende: OTF rotationsinvariant



Radiometrie der optischen Abbildung

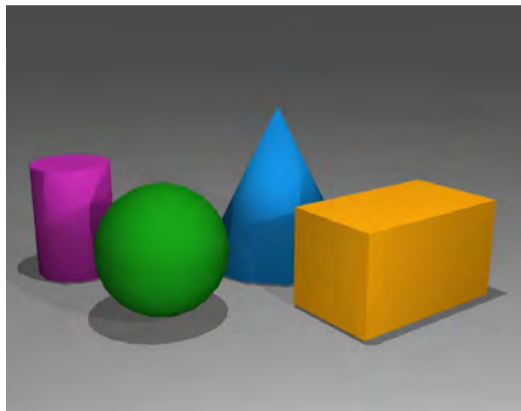
Objektstrahlungsdichte = Bestrahlungsstärke · Reflektivität

- ① “Helligkeit” ist **kein** Objektmerkmal
- ② Bestrahlungsstärke der Objekte unbekannt
- ③ Optische Eigenschaften der Objekte unbekannt

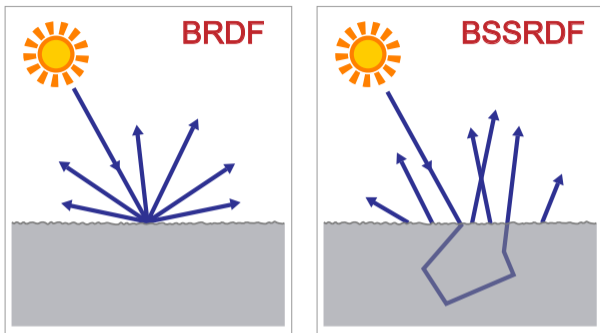
Farbwert ungleich Objekteigenschaft



Ideal



Real



- **Objektstrahlungsdichte** = Funktion(Richtungsverteilung der Bestrahlung, Oberflächenneigung, Reflexionseigenschaften, Eindringtiefe der Strahlung, ...)
- Bidirectional reflectance distribution function (**BRDF**)
- Bidirectional surface scattering reflectance distribution function (**BSSRDF**)
Beispiele: Biologisches Gewebe, Kunststoffe & Verbundmaterialien

Zusammenfassung: Grenzen konventioneller optischer Abbildung

Geometrisch

- Absolute Entfernung unbekannt
- Gegenstandsgröße unbekannt
- Neigung von Oberflächen im Raum unbekannt
- Volumetrische Objekte nicht erkennbar
- Geringe Tiefenschärfe
- Limitierte Auflösung

Radiometrisch

- Helligkeit \neq Objekteigenschaften
- Beleuchtung unbekannt
- Optische Eigenschaften Objekte unbekannt

III Beispiele

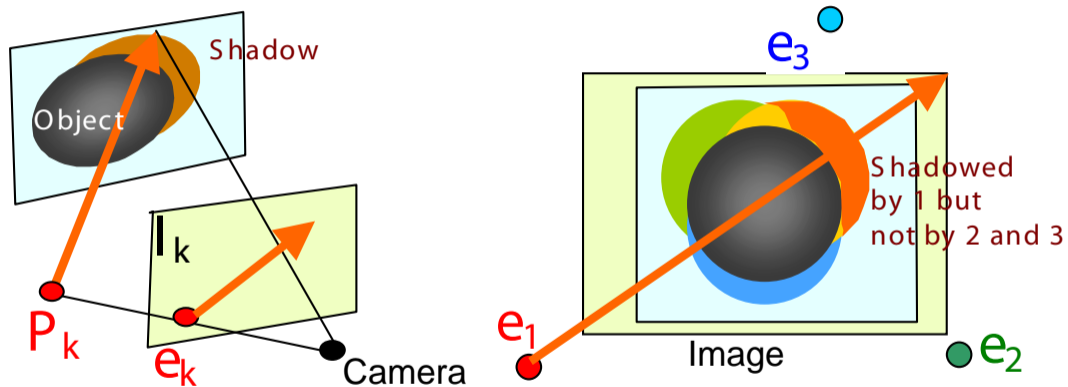
Computational Imaging

Bessere und robustere Objektmerkmale

Ansatz: Multimodale Bildaufnahme

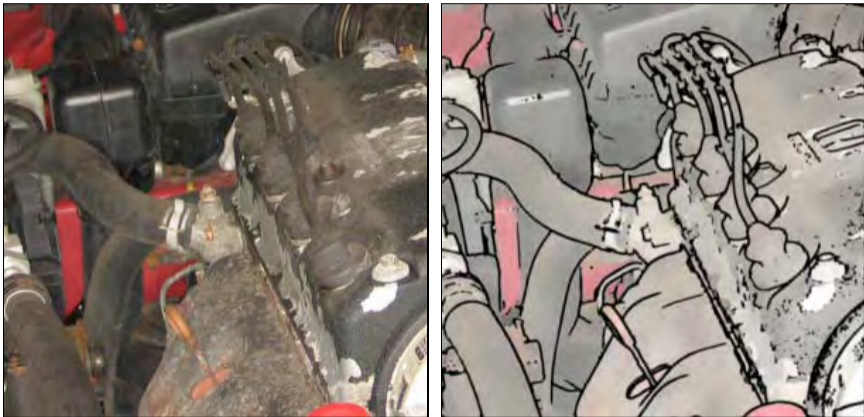
- Farbbild: Farbwert unabhängig von Helligkeit aber abhängig von Farbe Lichtquelle
- Multispektralbild: Direkte Identifikation von Materialien
- Polarisationsbilder: Bestimmung Oberflächenneigung
- Mehrfachbeleuchtung: photometrisches Stereo
- Laufzeitbilder: direkte Tiefenkarten
- ...
- Tiefenkanten durch farbige Beleuchtung

Tiefenkantendetektion mit farbiger Mehrfach-Beleuchtung



aus Raskar, 2004

Tiefenkantendetektion mit farbiger Mehrfach-Beleuchtung



aus Raskar, 2004

Extended Depth of Field (EDoF)

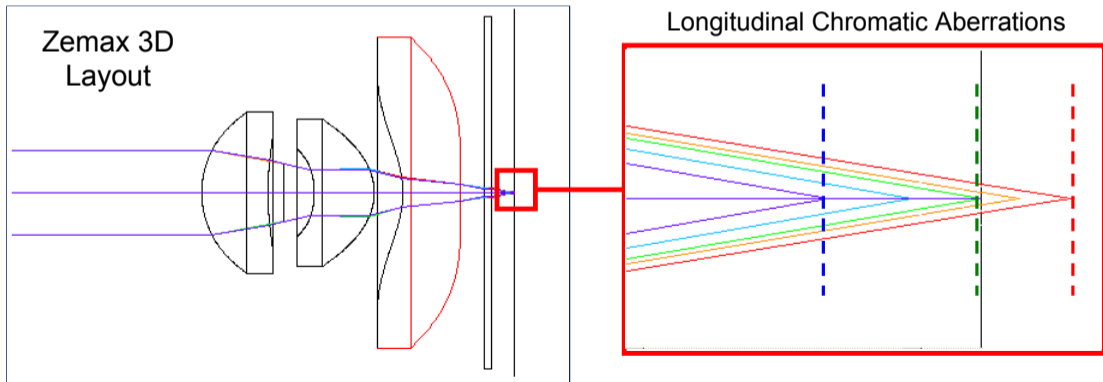


(aus M. Atif, 45. Bildverarbeitungsforum, Stuttgart, 01.03.2010)

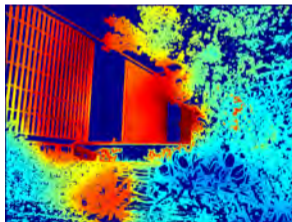
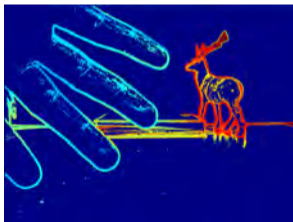
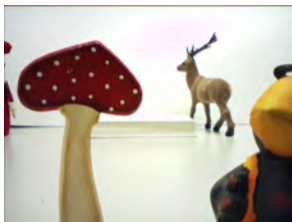
Ansatz hyperchromatisches Objektiv

Grundfarben rot, grün und blau in unterschiedlichen Entfernungen scharf

Zemax Design: Color Uncorrected Lens

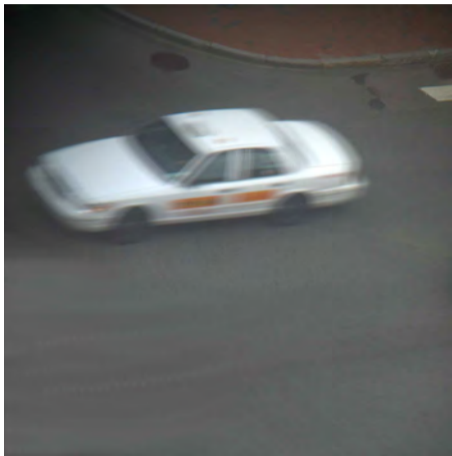


Übertragung der Schärfe in andere Farbkanäle liefert tiefenscharfes Bild und grobe Tiefenkarte



Muhammad Atif, Dissertation, 2012

Geringere Bewegungsunschärfe durch kodierte Beleuchtung

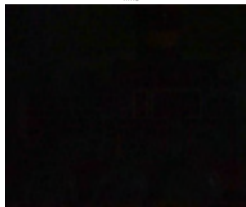
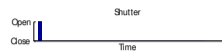


(b) Rectified Crop



Raskar et al., Siggraph 2006

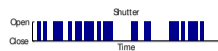
Kodiertes Licht liefert gleiche Helligkeit, Bewegungsunschärfe kann restauriert werden



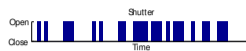
(a) Short Exposure Photo



(b) Traditional, 200ms



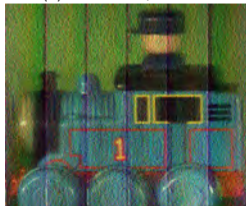
(c) MURA Code, 200ms



(d) Our Code, 200ms



(e) Log intensity of (a)



(f) Deblurred Image



(g) Deblurred Image



(h) Deblurred Image

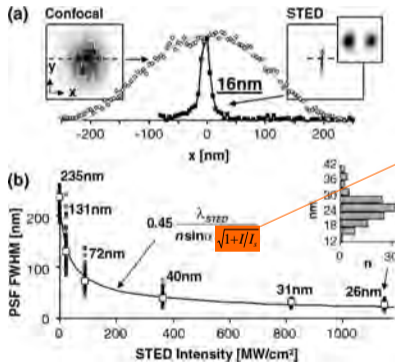
Raskar et al., Siggraph 2006

Überwindung der Abbeschen Auflösungsgrenze, Nobelpreis Chemie 2014, Stefan Hell

Max Planck
Society

Abbes barrier broken:

6

measured subdiffraction *single molecule* PSF:Exp. proof of
new
resolution law

V. Westphal, S.W. Hell (2005), *Phys. Rev. Lett.* **94**, 143903.

Überwindung der Abbeschen Auflösungsgrenze, Nobelpreis Chemie 2014, Stefan Hell

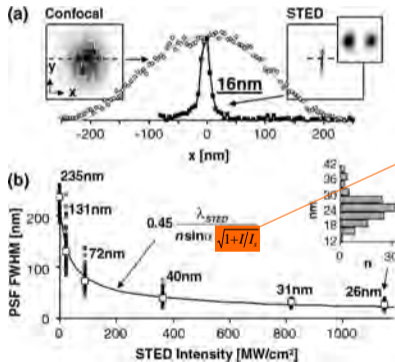


Max Planck Society



Abbes barrier broken:

6

measured subdiffraction *single molecule* PSF:

Exp. proof of new resolution law

V. Westphal, S.W. Hell (2005), *Phys. Rev. Lett.* **94**, 143903.

IV Zukunftsperspektiven

Computational Imaging

Zukunftsperspektiven

Computational Imaging

- Überwindet Grenzen konventioneller Bildaufnahmesysteme
- Nutzt synergetisch technischen Fortschritt aller Komponenten eines Bildaufnahmesystems: Beleuchtung, Optik, Bildsensor, Embedded Processing
- Breiter Einsatz möglich wegen Miniaturisierung, Leistungsfähigkeit und geringere Kosten alle Komponenten, wenn ...
- ... offene Standards zwischen allen Komponenten verfügbar

Literatur I



O. Faugeras

Three-Dimensional Computer Vision — A Geometric Viewpoint.

MIT Press, Cambridge, 1993,

<https://mitpress.mit.edu/books/three-dimensional-computer-vision>.



B. Jähne, H. Haußecker und P. Geißler (eds.).

Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 1 Sensors and Imaging.

Academic Press, San Diego, 1999.







B. Jähne und H. Haußecker (eds.).

Computer Vision and Applications, A Guide for Students and Practitioners.

Academic Press, San Diego, 2000,

<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123797773>.

Literatur II

-  B. Jähne.
Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung.
Springer, Berlin, 7. Auflage, 2012, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04952-1>.
-  X. Jiang and H. Bunke.
Dreidimensionales Computersehen — Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern.
Springer, Berlin, 1997, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-61447-7>
-  R. Klette, A. Koschan und K. Schlüs.
Computer Vision — Räumliche Information aus digitalen Bildern.
Kluwer, Dordrecht, 1995, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-11999-9>
-  T. Luhmann.
Nahbereichsphotogrammetrie — Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 3. Auflage.
Wichmann, Heidelberg, 2010.

Literatur III



P. Geißler, T. Dierig und H. A. Mallot.

Three-dimensional imaging algorithms.

Computer Vision and Applications, A Guide for Students and Practitioners, B. Jähne und H. Haußecker (eds.), pp. 397–438, Academic Press, San Diego, 2000.



G. Häusler.

Three-dimensional sensors — Potentials and Limitations.

in *Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 1: Sensors and Imaging*, B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler (eds.), pp. 485–506, Academic Press, San Diego, 1999.



R. W. Malz.

Three-dimensional sensors for high-performance surface measurement in reverse engineering.

in *Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 1: Sensors and Imaging*, B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler (eds.), pp. 507–539, Academic Press, San Diego, 1999.

Literatur IV



H. Rapp.

Experimental and Theoretical Investigation of Correlating TOF-Camera Systems.
Diplomarbeit, Universität Heidelberg, 2007,
<http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/7666>



R. Raskar, K.-H. Tan, R. Feris, J. Yu, and M. Turk.

Non-photorealistic camera: depth edge detection and stylized rendering using multi-flash imaging.
Siggraph 2004, p. 679–688, <http://dx.doi.org/10.1145/1186562.1015779>.



R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin.

Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter.
Siggraph 2006, <http://dx.doi.org/10.1145/1179352.1141957>.

Literatur V



R. Schwarte, Z. Xu, H. Heinol, J. Olk, and B. Buxbaum.

New optical four-quadrant phase-detector integrated into a photogate array for small and precise 3D-cameras.

SPIE Proc. Vol. 3023, p. 119, 1997, <http://dx.doi.org/10.1117/12.269749>.



S. Wanner, J. Fehr, and B. Jähne.

Generating EPI Representations of 4D Light Fields with a Single Lens Focused Plenoptic Camera.

7th International Symposium on Visual Computing, Las Vegas, Sept. 24-26, 2011,
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-24028-7_9.



S. Wanner.

Orientation Analysis in 4D Light Fields.

Dissertation, Universität Heidelberg, 2014,

<http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/16439>

Literatur VI



S. Wanner and B. Goldlücke.

Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution.

IEEE Trans. PAMI, , 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2013.147>.