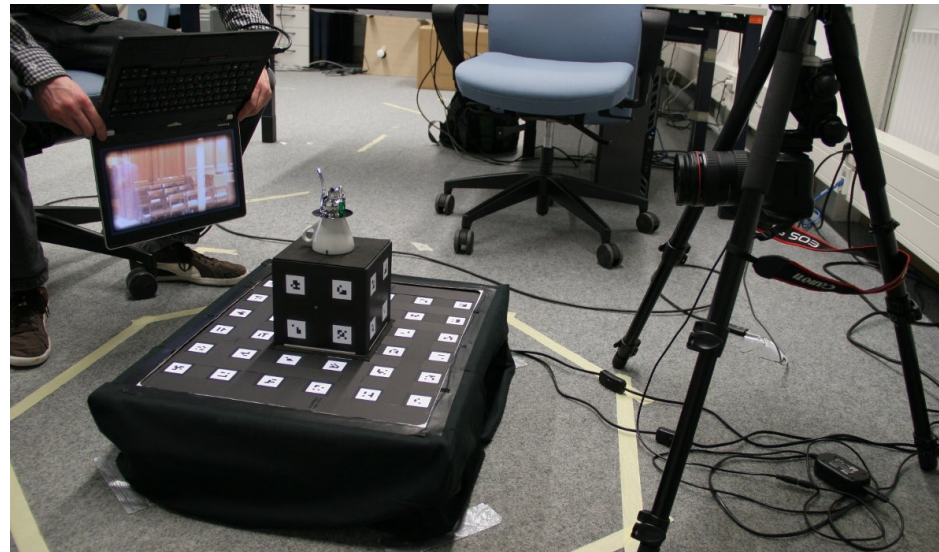


Diplomarbeit Nr. 3596
HDR-Beleuchtung von realen Objekten
mit einem LDR-Bildschirm
für fotografische Anwendungen

Referent: Manuel Jerger

Prüfer: Jun.-Prof. Martin Fuchs
Betreuer: Sebastian Koch, M.Sc.



Die Idee

- Beleuchtung in der Fotografie
- Problematische Szenen
 - Spiegelnde Oberflächen
 - Transparente Objekte



Die Idee

- Beleuchtung in der Fotografie
- Problematische Szenen
 - Spiegelnde Oberflächen
 - Transparente Objekte
- Fotostudio
 - Flächenlichtquellen
 - Lichtzelt



Lichtzelt (Quelle [2])

Die Idee

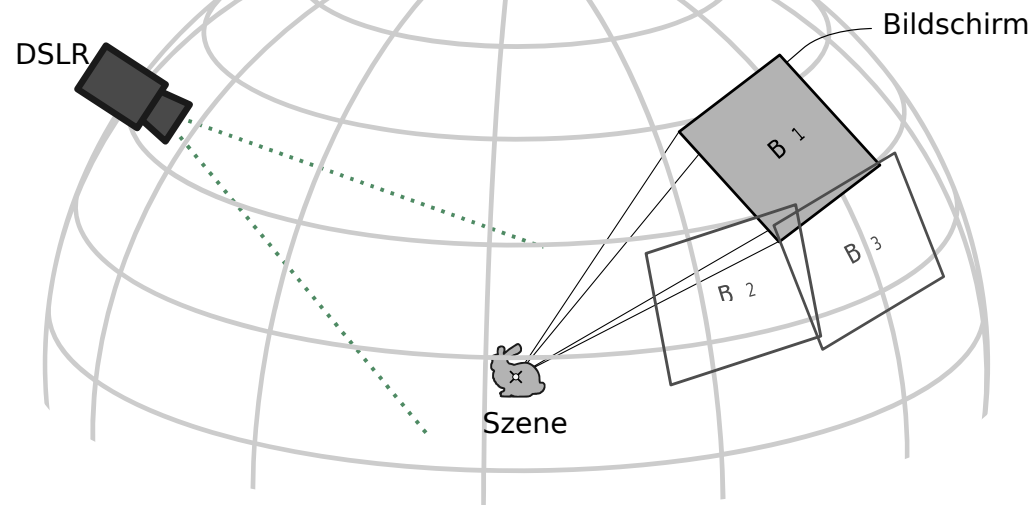
- Beleuchtung in der Fotografie
- Problematische Szenen
 - Spiegelnde Oberflächen
 - Transparente Objekte
- Fotostudio
 - Flächenlichtquellen
 - Lichtzelt
- Flachbildschirm als Lichtquelle
 - + Hohe Auflösung
 - Kosten
 - Kontrastverhältnis



Lichtzelt (Quelle [2])

Idee

- Ansatz
 - Ein mobiler Bildschirm
 - Beleuchtung stückweise erzeugen
 - Position muss bekannt sein
 - Überlappungen beachten



Grundlagen 1/2: Kontrastverhältnis

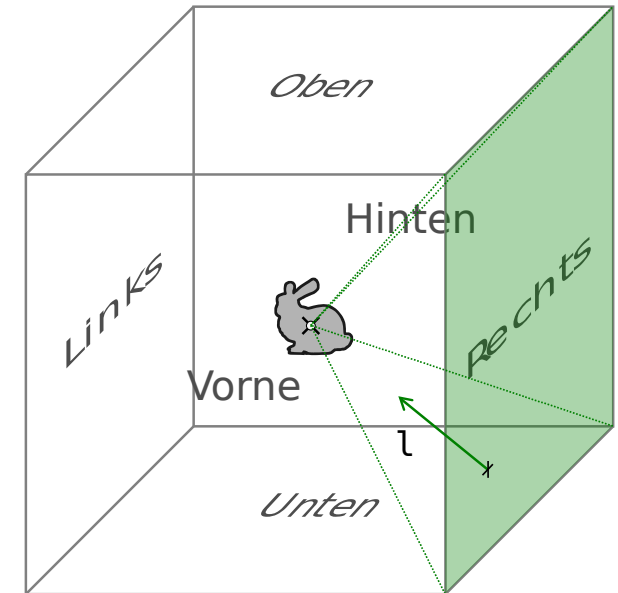
- Auch: „Kontrastumfang“ (engl: „Dynamic Range“)
- Verhältnis vom größten zum kleinsten Wert > 0
- Hier: Definition über die Strahldichte

$$R = \frac{\text{größte Strahldichte}}{\text{kleinste Strahldichte}} > 0$$

- Bildschirme, Kameras : $R < 1000$ („**L**ow **D**ynamic **R**ange“)
- Licht in realen Szenen: $R > 10^{10}$ („**H**igh **D**ynamic **R**ange“)
- HDR-Beleuchtung für realistische Ergebnisse

Grundlagen 2/2: Beleuchtungsmodell

- Environment-Maps
 - Einfallende Strahldichte im Ursprung
 - Verschiedene Darstellungsformen
- Cube-Maps
 - Sechs Texturen
 - Pixelposition bestimmt Richtung



Ennis-Brown House (Quelle: Hi-Res Light Probe Gallery [9])

Verwandte Arbeiten : Light-Stages

- Verschiedene Anwendungen
 - Messen von Reflektanzfeldern
 - Fotografische Beleuchtung
- Unterschiedliche Bauarten



Debevec Light-Stage 3 (Quelle [2])

Verwandte Arbeiten : Light-Stages

- Verschiedene Anwendungen
 - Messen von Reflektanzfeldern
 - Fotografische Beleuchtung
- Unterschiedliche Bauarten

1) Fixes Lampen-Array

- Beleuchtung in Echtzeit
- Bewegte Szenen



Debevec Light-Stage 3 (Quelle [2])

Debevec et al. (2002):

A Lighting Reproduction Approach to Live-action Compositing. [2]

Lamond et al. (2006):

Relighting Character Motion for Photoreal Simulations. [3]

Verwandte Arbeiten : Light-Stages

2) Mobile Lampen

- Statische Szenen
- Fixe Kamera, mehrere Aufnahmen
- Linearkombination der Fotos
- Lampenposition muss bekannt sein



Debevec Light Stage (Quelle [4])

Verwandte Arbeiten : Light-Stages

2) Mobile Lampen

- Statische Szenen
- Fixe Kamera, mehrere Aufnahmen
- Linearkombination der Fotos
- Lampenposition muss bekannt sein

Debevec et al. (2000):

Acquiring the Reflectance Field of
a Human Face. [4]

Masselus et al. (2005):

The Free-form Light Stage. [5]



Debevec Light Stage (Quelle [4])



Free-form Light Stage (Quelle [5])

Manuel Jerger

Verwandte Arbeiten : Light-Stages

2) Mobile Lampen

- Statische Szenen
- Fixe Kamera, mehrere Aufnahmen
- Linearkombination der Fotos
- Lampenposition muss bekannt sein

Debevec et al. (2000):

Acquiring the Reflectance Field of
a Human Face. [4]

Masselus et al. (2005):

The Free-form Light Stage. [5]

- Einschränkungen
 - Geringe Auflösung
 - Hintergrund nicht erzeugbar



Debevec Light Stage (Quelle [4])

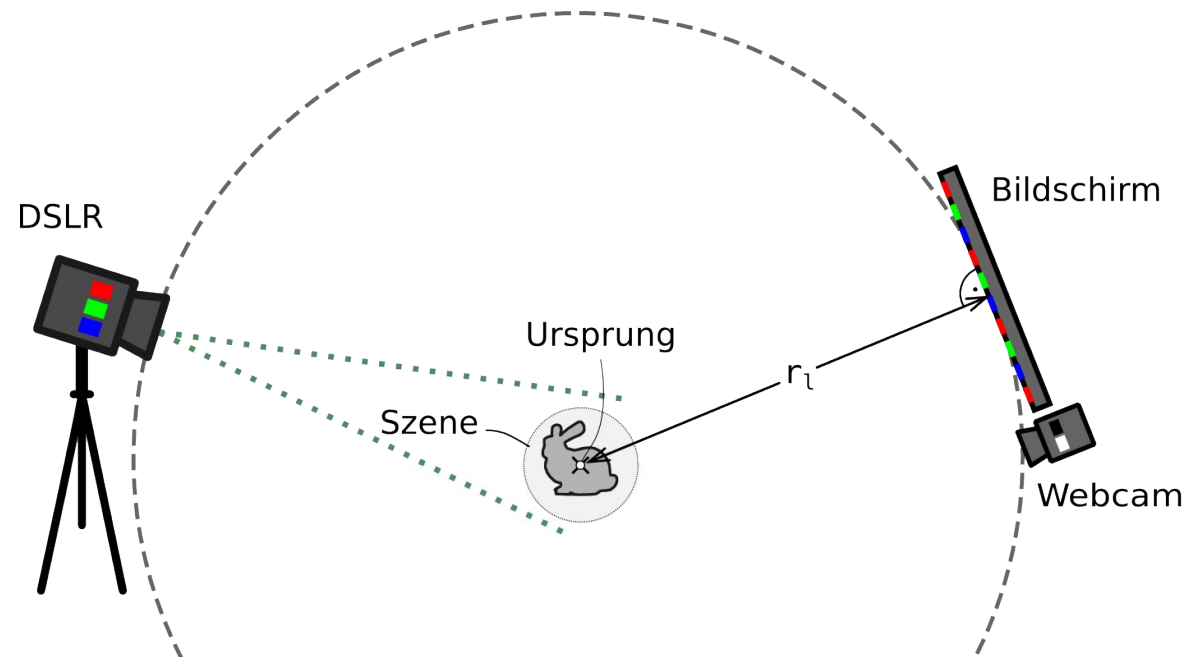


Free-form Light Stage (Quelle [5])

Manuel Jerger

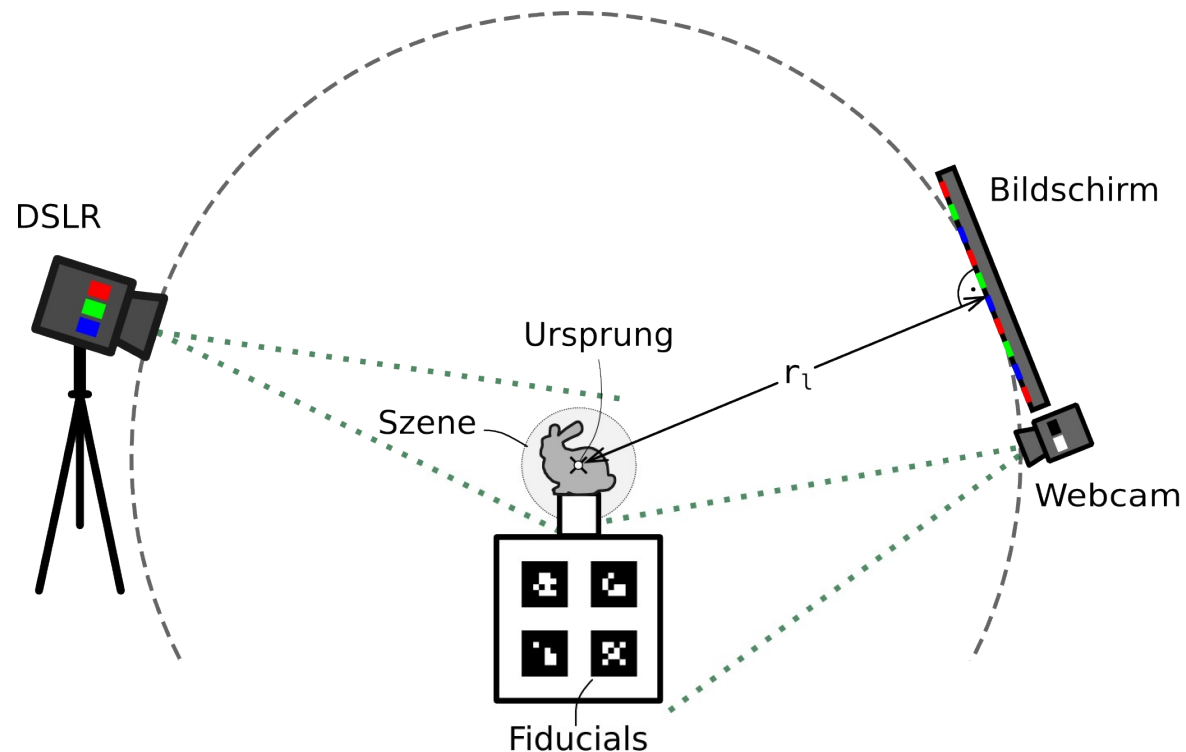
Das System

- Abgedunkelter Raum
- Statische Szene
- DSLR-Kamera
- Flachbildschirm
- Webcam
- Laptop / Tablet



Das System

- Abgedunkelter Raum
- Statische Szene
- DSLR-Kamera
- Flachbildschirm
- Webcam
- Laptop / Tablet
- Fiducials
 - Quadratische Muster
 - Geometrie bekannt
 - Position bekannt



Positionsberechnung

- ARToolKit Library [7]
 - Augmented Reality
 - Rendering überlagern
- Webcam geometrisch kalibrieren
 - Pinhole-Modell
 - Linsenverzerrung

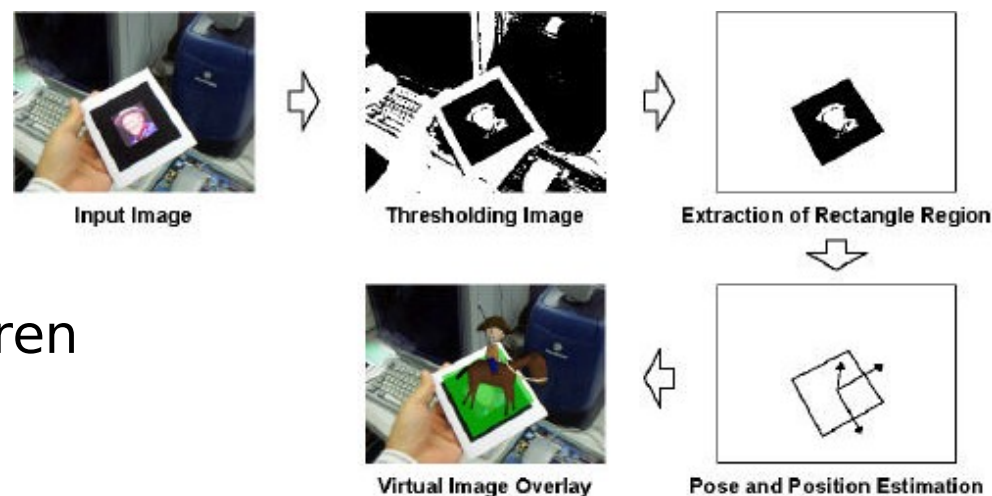
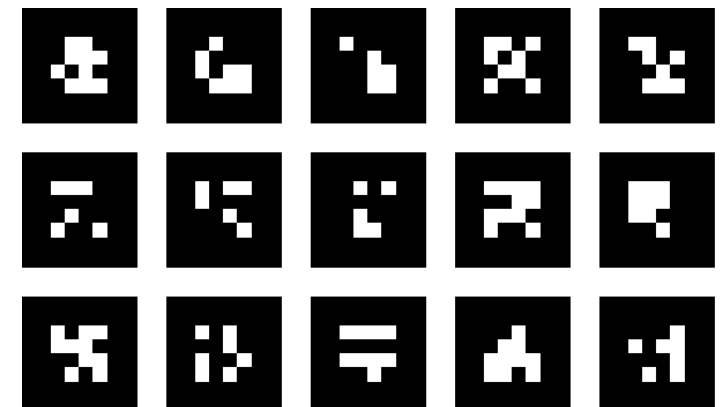
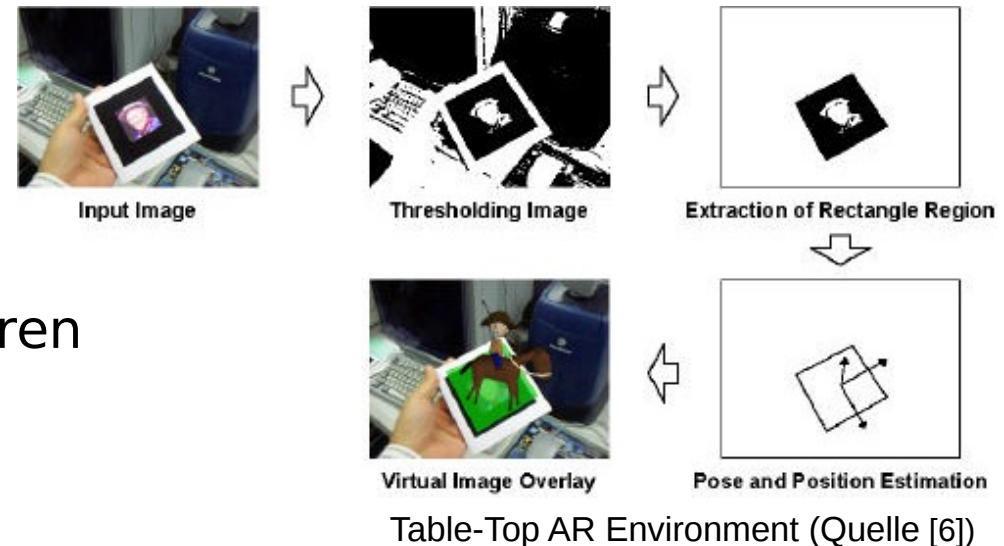


Table-Top AR Environment (Quelle [6])

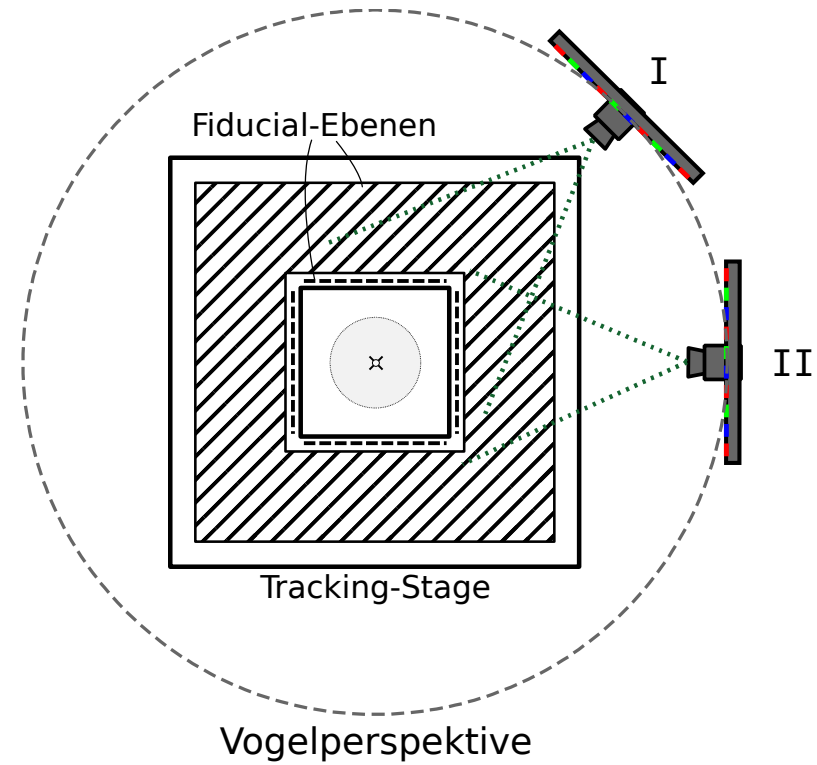
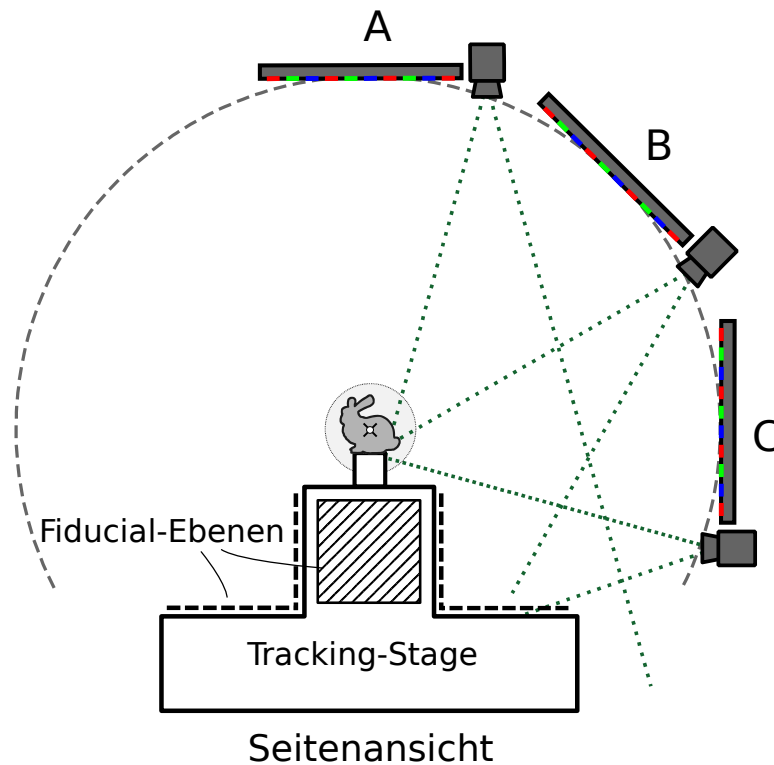
Positionsberechnung

- ARToolKit Library [7]
 - Augmented Reality
 - Rendering überlagern
- Webcam geometrisch kalibrieren
 - Pinhole-Modell
 - Linsenverzerrung
- ARToolKit Fiducials
 - Viele gleichzeitig verwendbar
 - Eindeutige Muster
 - Algorithmisch erzeugt

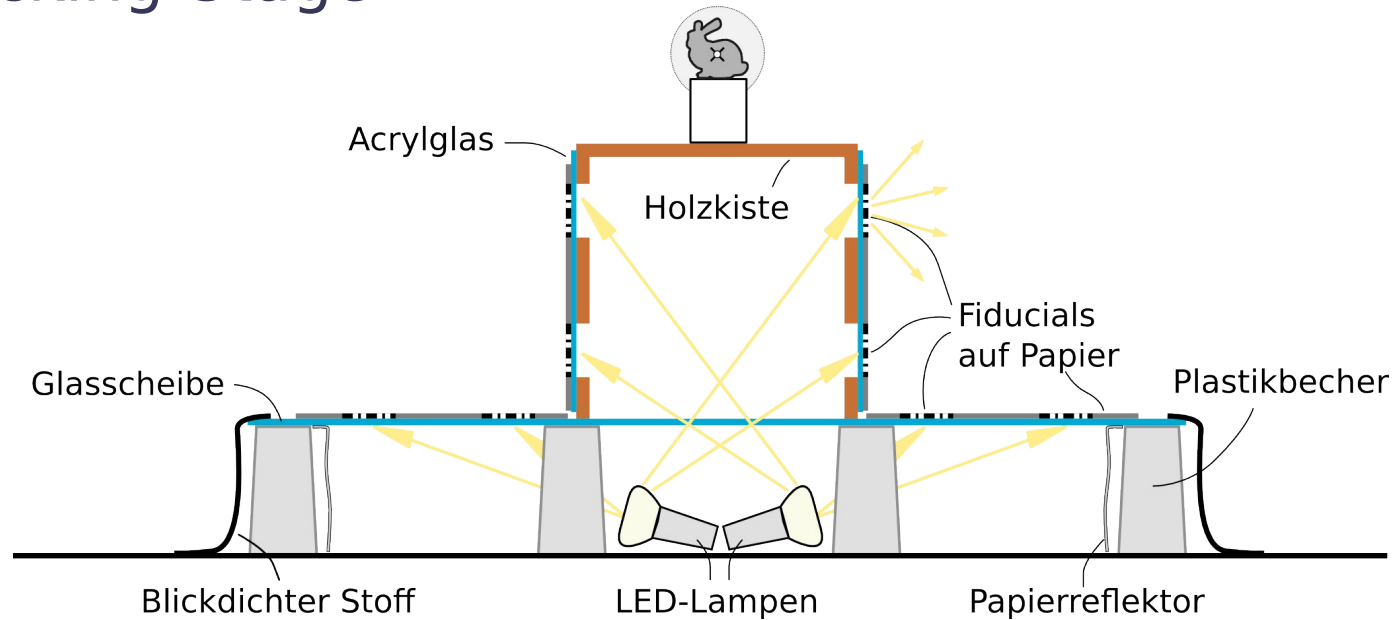


Die Tracking-Stage

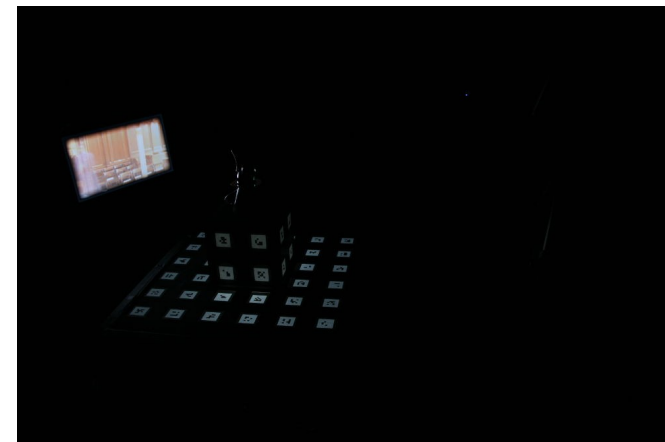
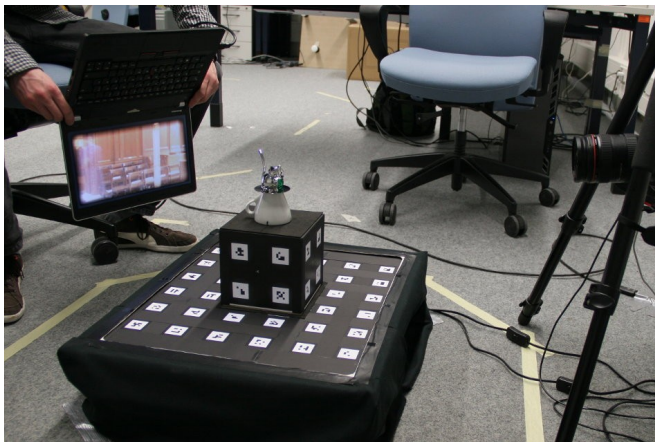
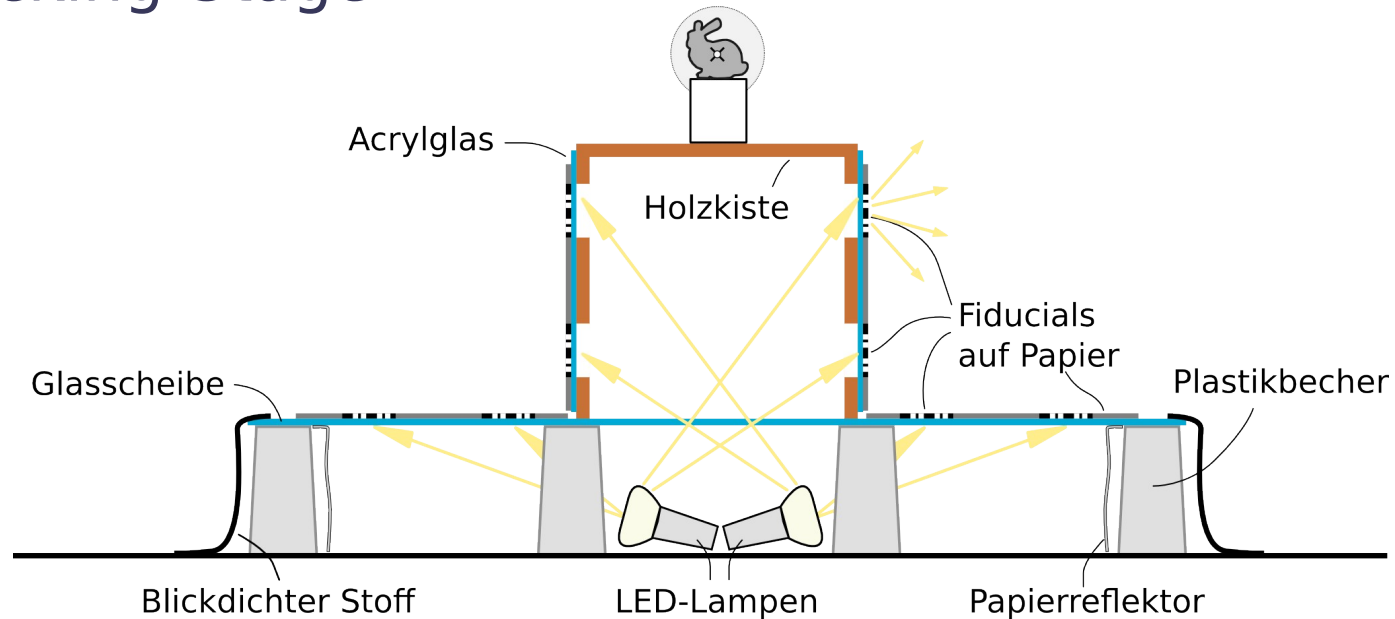
- Fünf Fiducial-Ebenen unterhalb der Szene
- Teile der Ebenen liegen immer im Webcam-Frustum
- Leuchtende Fiducials



Die Tracking-Stage

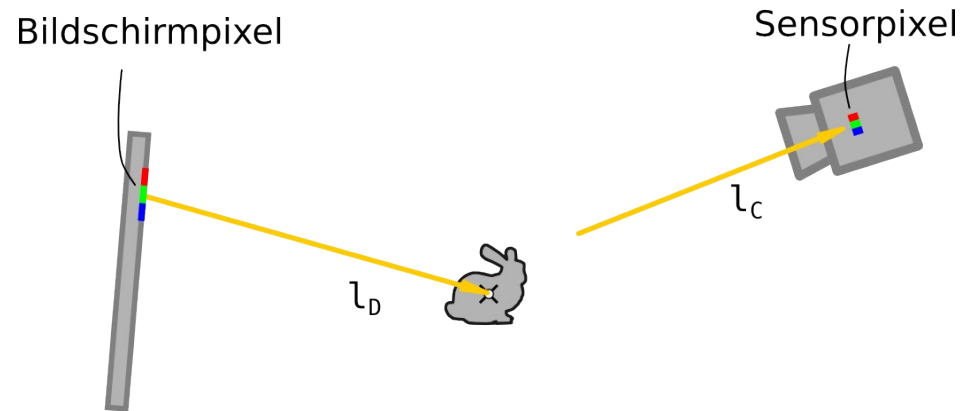
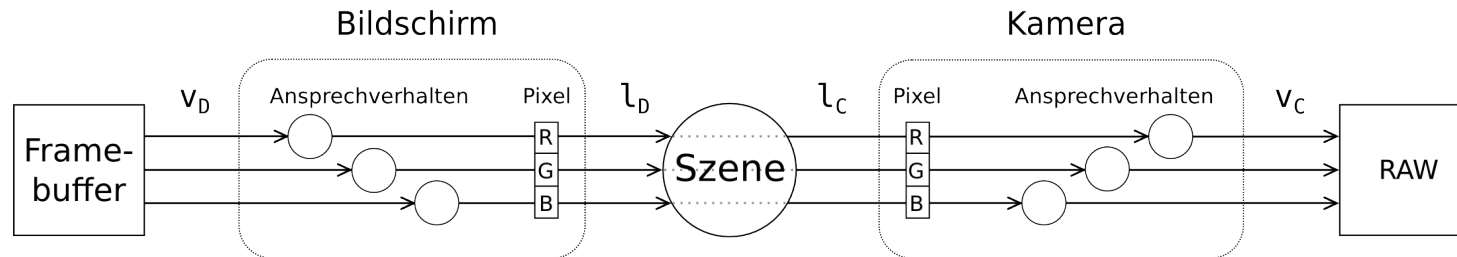


Die Tracking-Stage



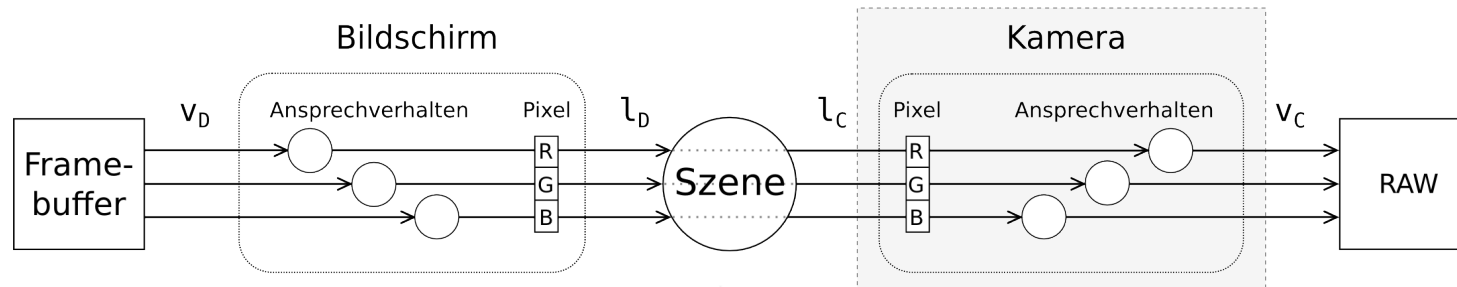
Das radiometrische Modell

- Radiometrische Pipeline:



Das radiometrische Modell

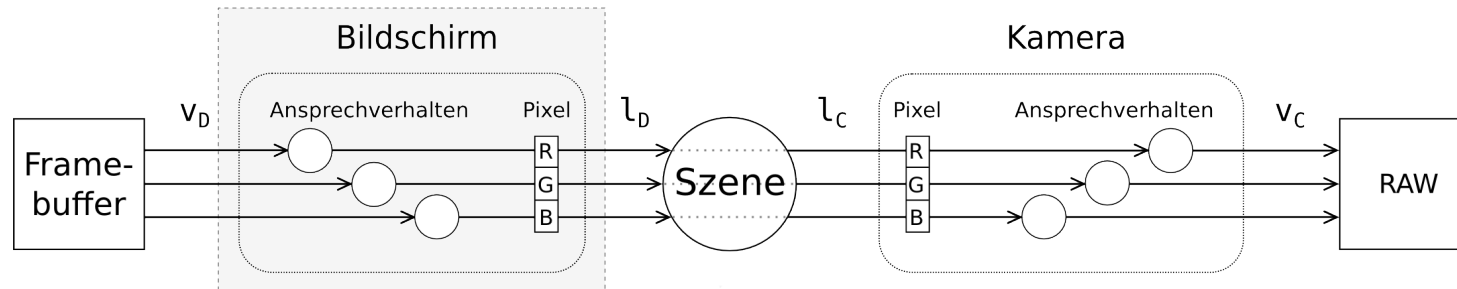
- Radiometrische Pipeline:



- Ansprechverhalten der Kamera
 - Rekonstruiert mit dem Verfahren von Robertson et al. [8]
 - Ermöglicht das Messen von Strahldichte

Das radiometrische Modell

- Radiometrische Pipeline:



- Ansprechverhalten der Kamera
 - Rekonstruiert mit dem Verfahren von Robertson et al. [8]
 - Ermöglicht das Messen von Strahldichte
- Ansprechverhalten des Bildschirms
 - Je Pixel ein eigenes Ansprechverhalten
 - stückweise lineare Funktionen
 - Wertebereich messen und invertieren

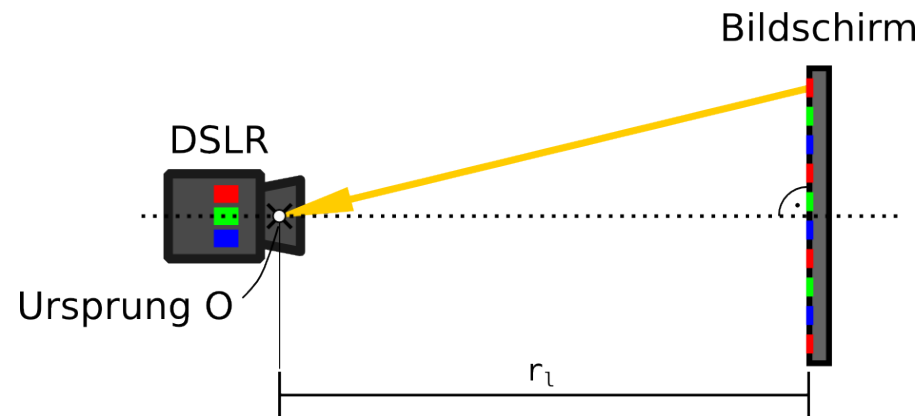
Je Pixel:

$$l_D = l(v_D) \quad v_D \in [0, 255]$$

$$v_D = l^{-1}(l_D) \quad l_D \in [l(0), l(255)]$$

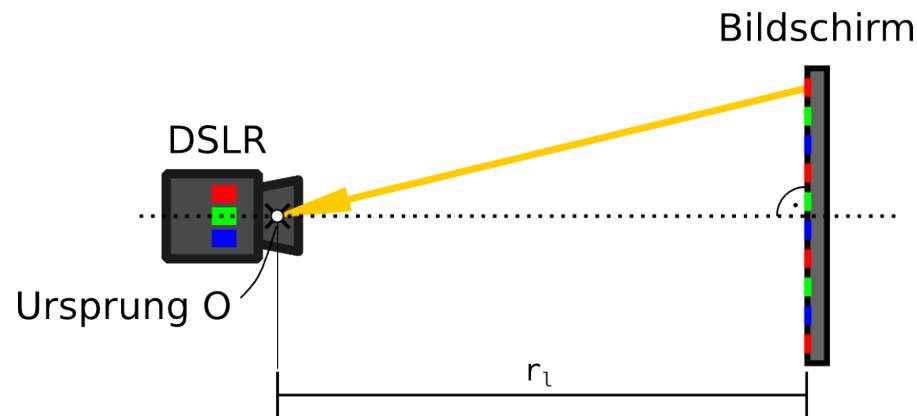
Das radiometrische Modell

- Mit DSLR-Kamera die Strahldichte im Ursprung messen
 - DSLR radiometrisch und geometrisch kalibriert
 - Bildschirmabstand r_l und Orientierung fix



Das radiometrische Modell

- Mit DSLR-Kamera die Strahldichte im Ursprung messen
 - DSLR radiometrisch und geometrisch kalibriert
 - Bildschirmabstand r_l und Orientierung fix



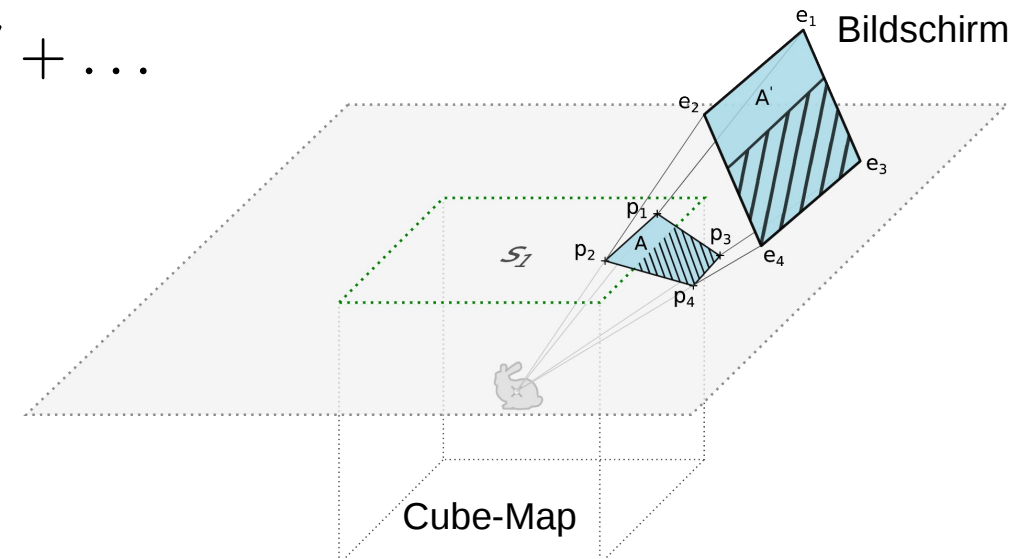
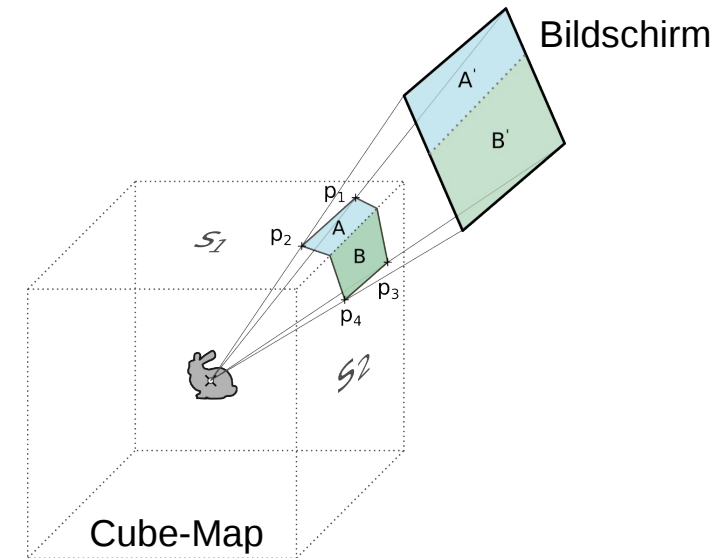
- Ansprechverhalten messen
 - Für alle $v_D \in \{0, 8, 16, \dots, 248, 255\}$:
 - Framebuffer auf v_D setzen
 - Aufnahme machen
 - Sensor- auf Bildschirmpixel abbilden

Beleuchtungsberechnung

- Strahldichte aller Pixel berechnen
 - Cube-Map gibt Beleuchtung vor
 - Lage der Bildelebene ist bekannt

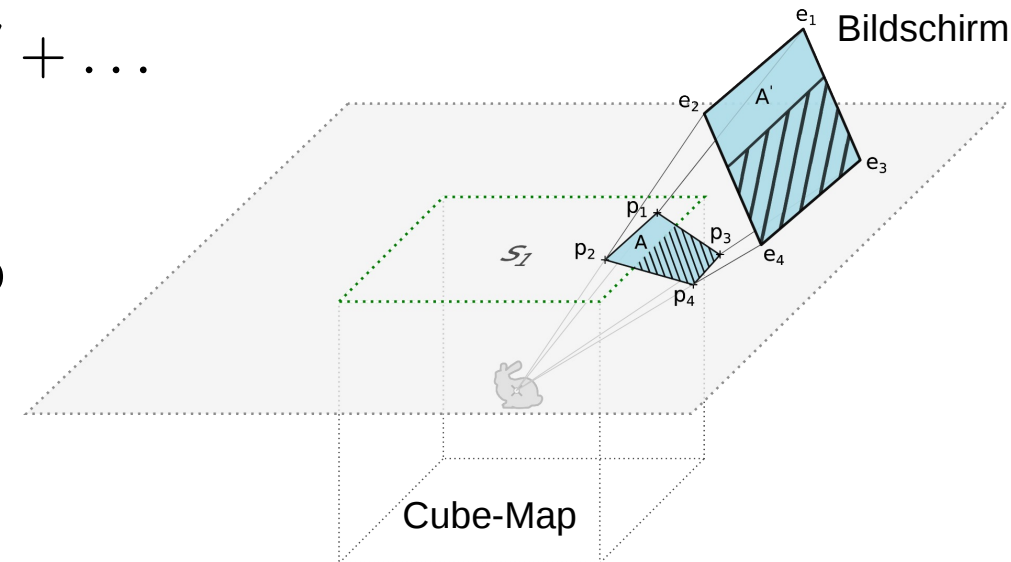
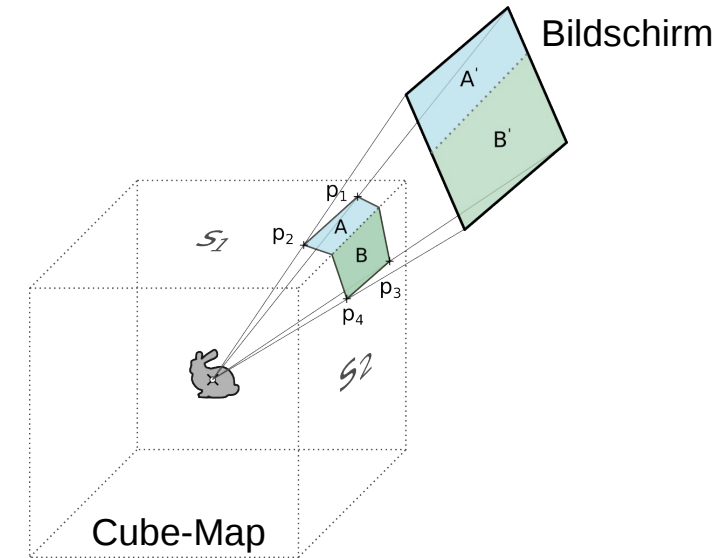
Beleuchtungsberechnung

- Strahldichte aller Pixel berechnen
 - Cube-Map gibt Beleuchtung vor
 - Lage der Bildelebene ist bekannt
- Perspektivische Projektionen
 - Cube-Map \xrightarrow{P} Bildschirm
 - Jede Seite einzeln abbilden
 - Aufaddieren: $L_r = A' + B' + \dots$



Beleuchtungsberechnung

- Strahldichte aller Pixel berechnen
 - Cube-Map gibt Beleuchtung vor
 - Lage der Bildelebene ist bekannt
- Perspektivische Projektionen
 - Cube-Map \xrightarrow{P} Bildschirm
 - Jede Seite einzeln abbilden
 - Aufaddieren: $L_r = A' + B' + \dots$
- Umkehrung möglich
 - Bildschirm $\xrightarrow{P^{-1}}$ Cube-Map
 - Inverse Projektionen



LDR-Beleuchtung

- Framebuffer berechenbar, wenn $L_0 \leq L_r \leq L_{255}$
- Kontrastverhältnis:

$$R_{LDR} = \frac{\min(L_{255})}{\max(L_0)}$$

- Problem bei LCD-Bildschirmen: L_0 sehr hoch

LDR-Beleuchtung

- Framebuffer berechenbar, wenn $L_0 \leq L_r \leq L_{255}$
- Kontrastverhältnis:

$$R_{LDR} = \frac{\min(L_{255})}{\max(L_0)}$$

- Problem bei LCD-Bildschirmen: L_0 sehr hoch
- Zusätzliche Aufnahme („Darkframe“)

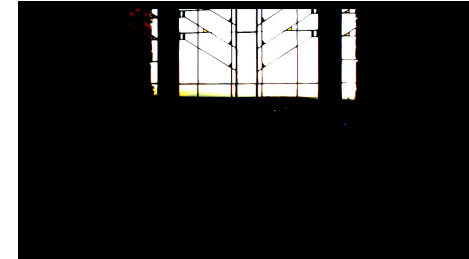
- Unveränderte Bildschirmposition
- Mit L_0 beleuchten (schwarzer Bildschirm)
- Von erster Aufnahme subtrahieren → Verändertes Kontrastverhältnis:

$$\begin{aligned} L'_0 &= L_0 - L_0 = 0 \\ L'_1 &= L_1 - L_0 \\ L'_{255} &= L_{255} - L_0 \end{aligned}$$

$$R'_{LDR} = \frac{\min(L'_{255})}{\max(L'_1)}$$

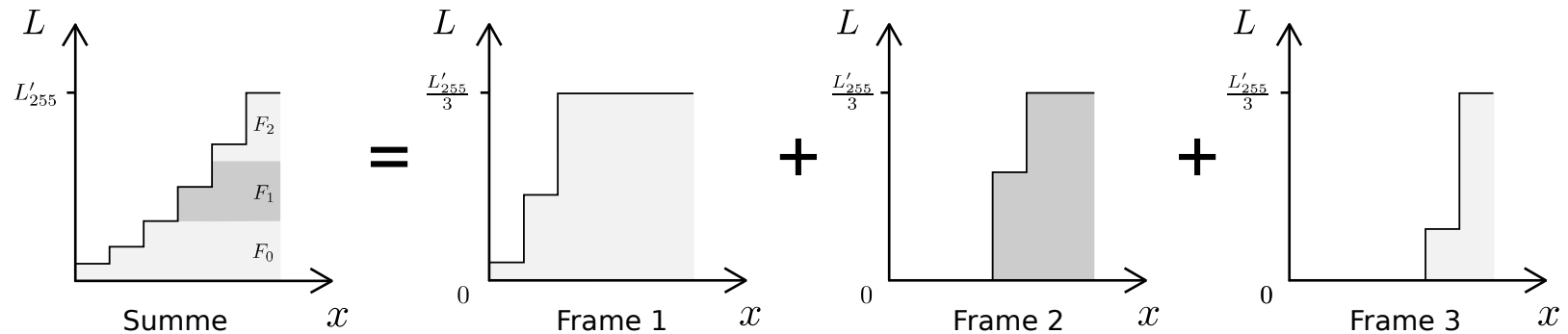
HDR-Beleuchtung

- Statt einem Bild eine Sequenz anzeigen



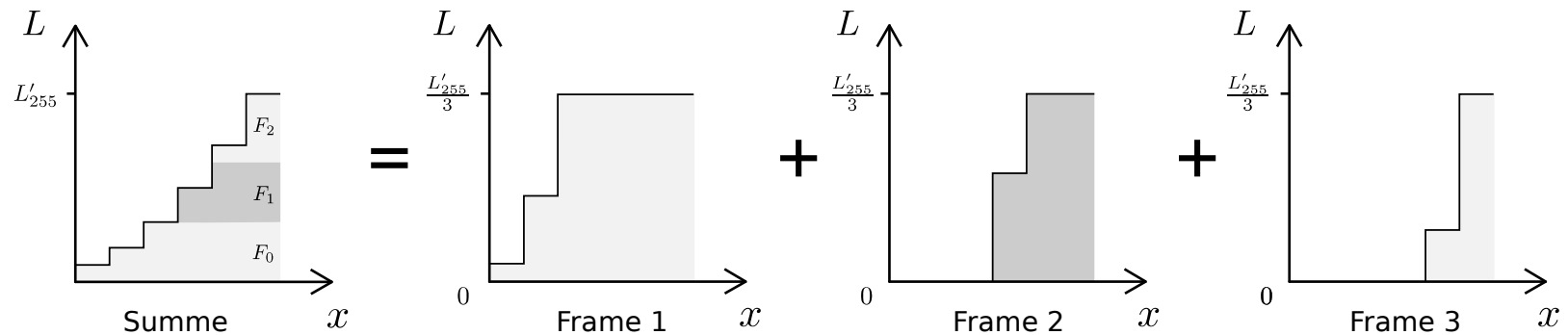
HDR-Beleuchtung

- Statt einem Bild eine Sequenz anzeigen



HDR-Beleuchtung

- Statt einem Bild eine Sequenz anzeigen



- Kontrastverhältnis erhöht sich linear in der Sequenzlänge m

$$R_{HDR} = m R'_{LDR}$$

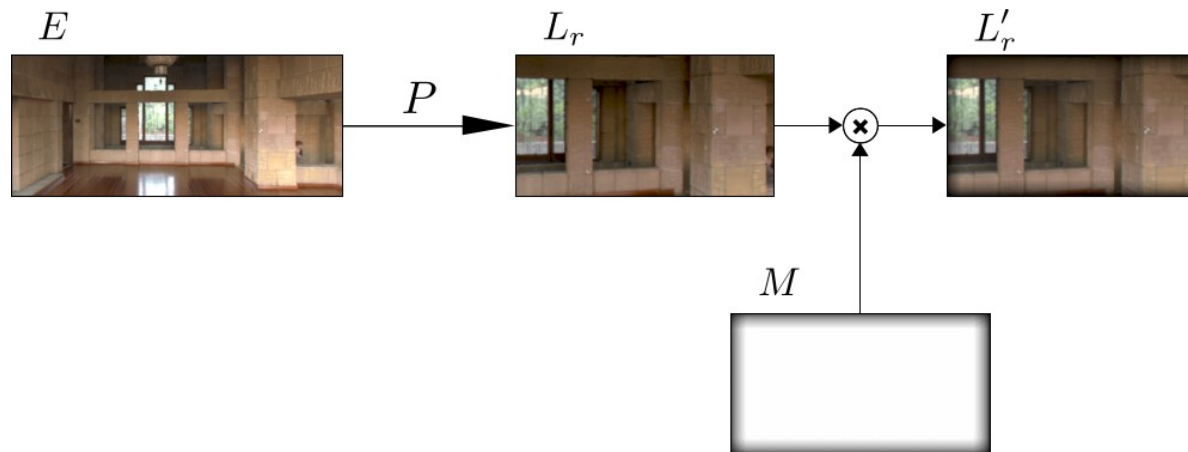
- Praxis: m begrenzt durch Framerate und Beleuchtungsdauer

Teilbeleuchtung

- Problem: Abweichung bei der Positionsbestimmung
 - Exakte Position ist nicht bekannt
 - Überlappungen und Lücken in der Beleuchtung
 - Lineare Rampen reduzieren den Fehler

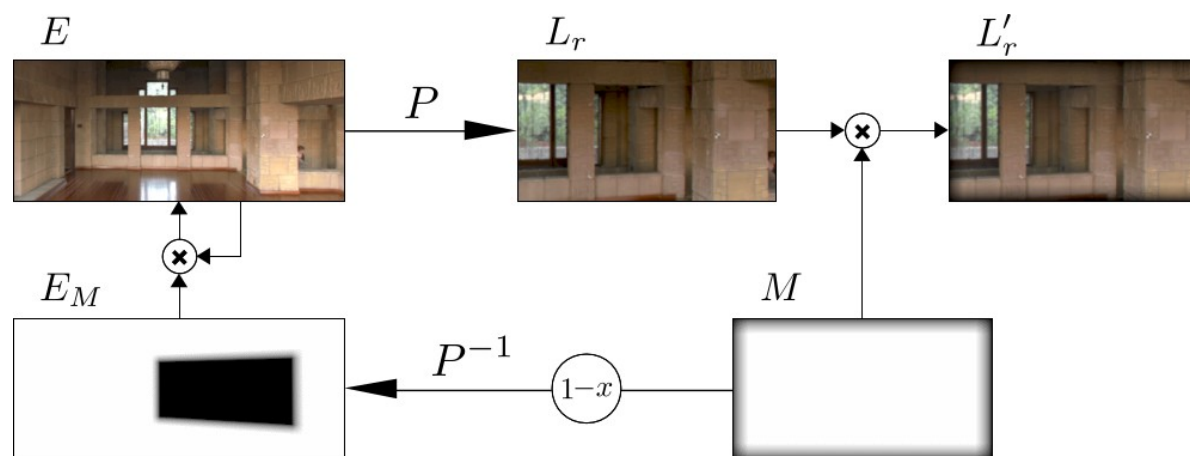
Teilbeleuchtung

- Problem: Abweichung bei der Positionsbestimmung
 - Exakte Position ist nicht bekannt
 - Überlappungen und Lücken in der Beleuchtung
 - Lineare Rampen reduzieren den Fehler



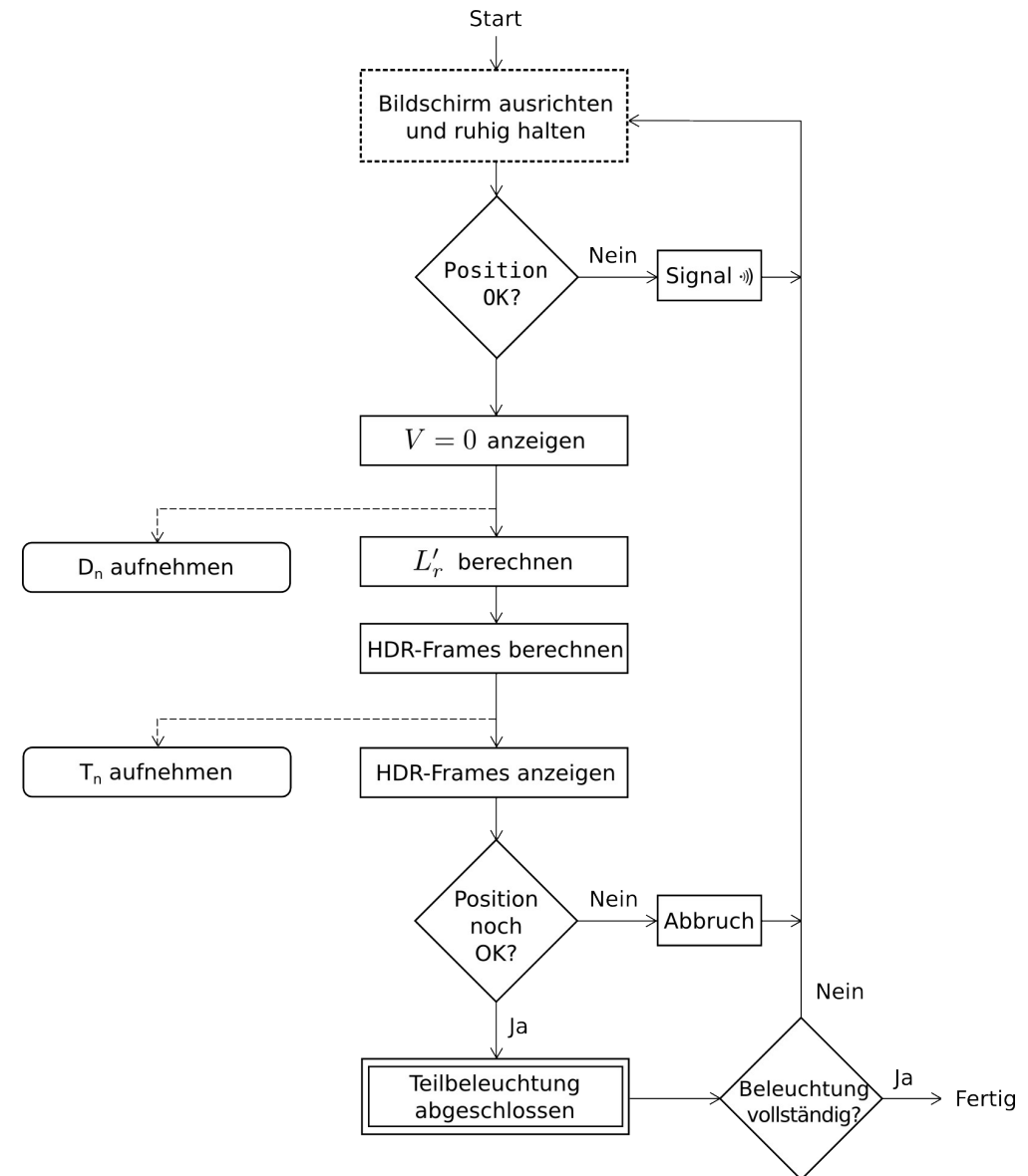
Teilbeleuchtung

- Problem: Abweichung bei der Positionsbestimmung
 - Exakte Position ist nicht bekannt
 - Überlappungen und Lücken in der Beleuchtung
 - Lineare Rampen reduzieren den Fehler



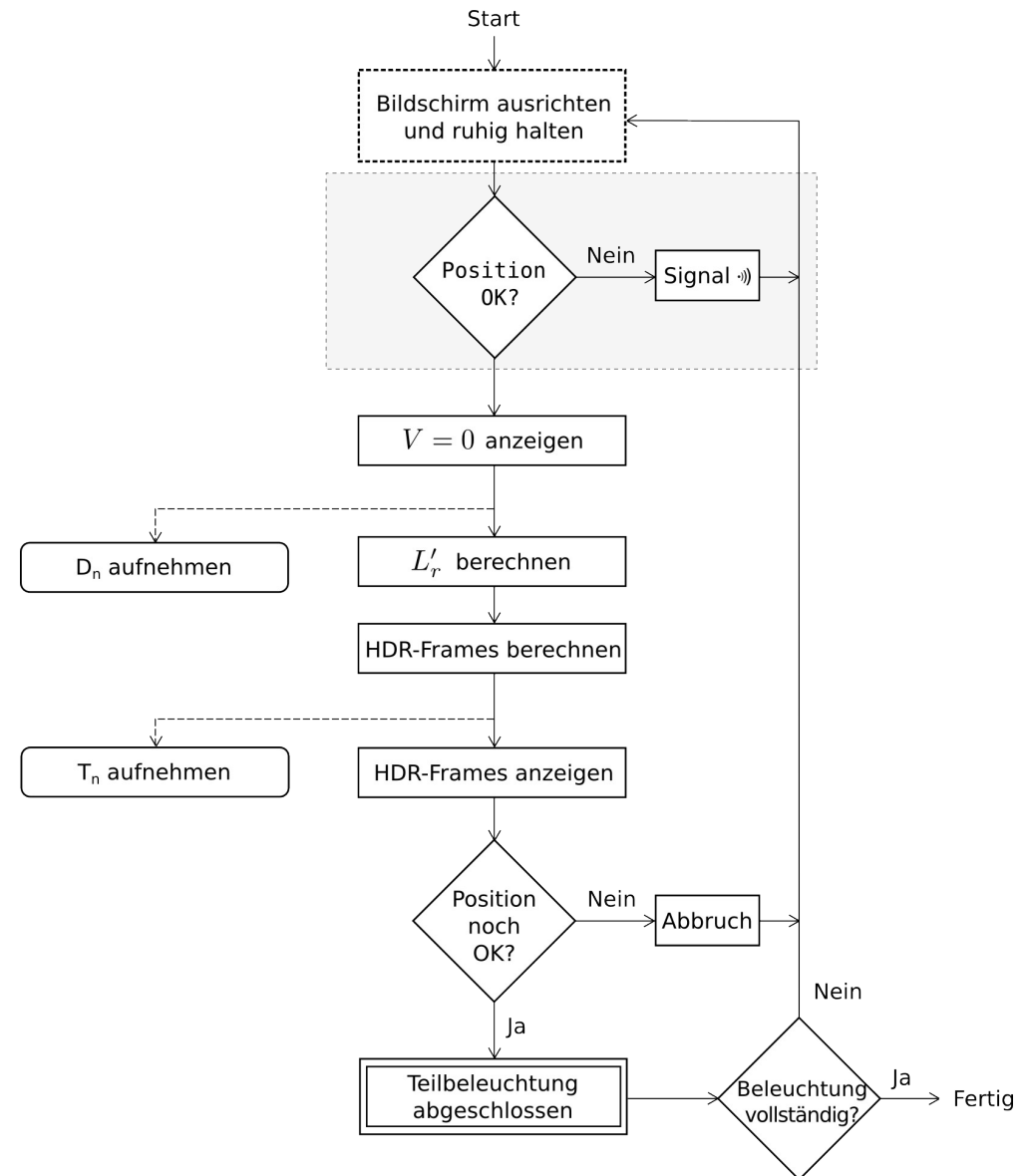
- Erzeugte Beleuchtung abziehen
 - Inverse Projektion von $1 - M$ auf Cube-Map E_M
 - Multiplikation von E mit E_M

Vollständige Beleuchtung



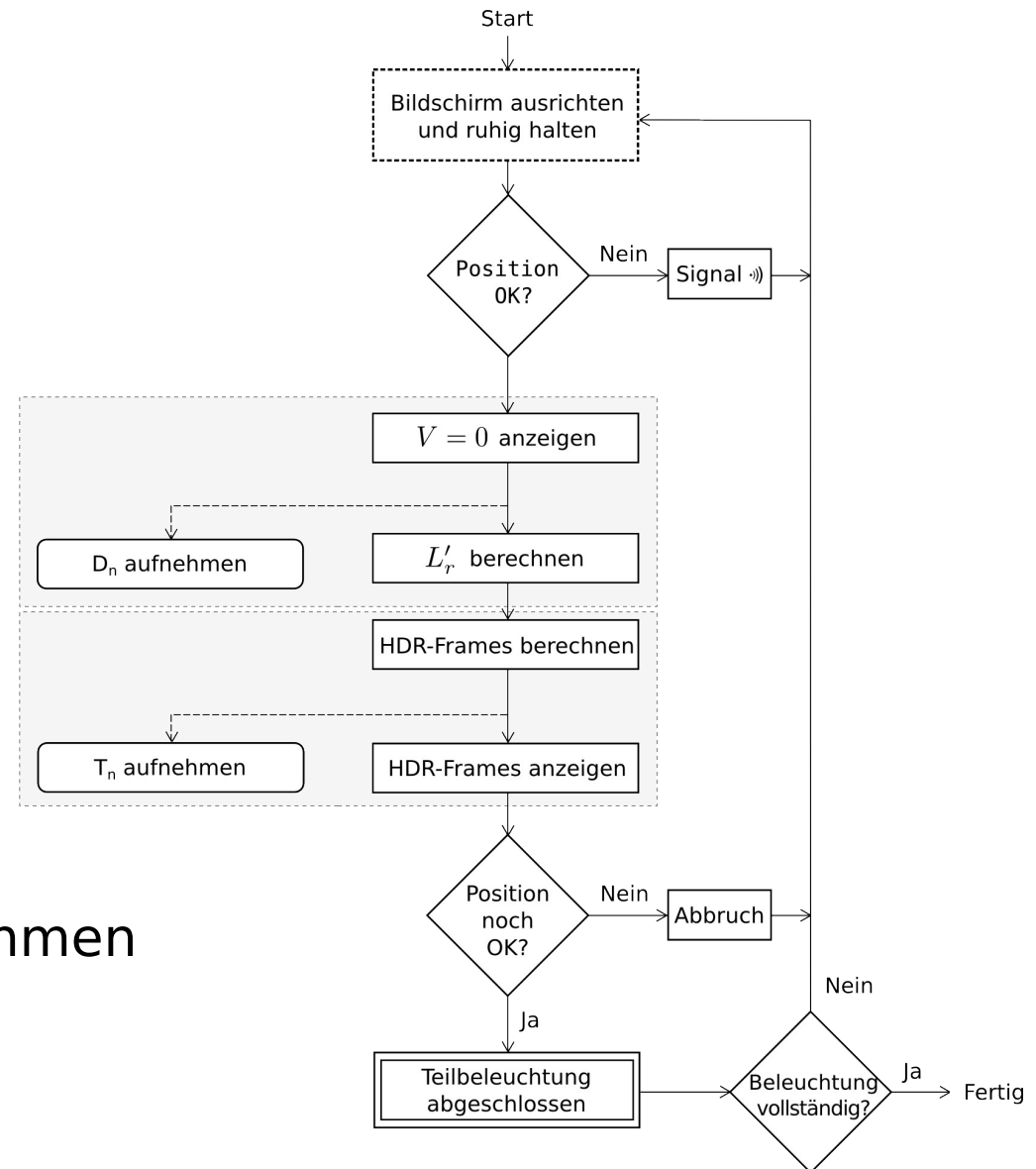
Vollständige Beleuchtung

- Position überprüfen
 - Abstand ($\pm 10\%$)
 - Winkel ($\pm 5^\circ$)
 - Verwackler, Drift
 - Überlappung



Vollständige Beleuchtung

- Position überprüfen
 - Abstand ($\pm 10\%$)
 - Winkel ($\pm 5^\circ$)
 - Verwackler, Drift
 - Überlappung
- Phase 1
 - Frames berechnen
 - Darkframe D_n aufnehmen
- Phase 2
 - Frames anzeigen
 - Teilbeleuchtung T_n aufnehmen

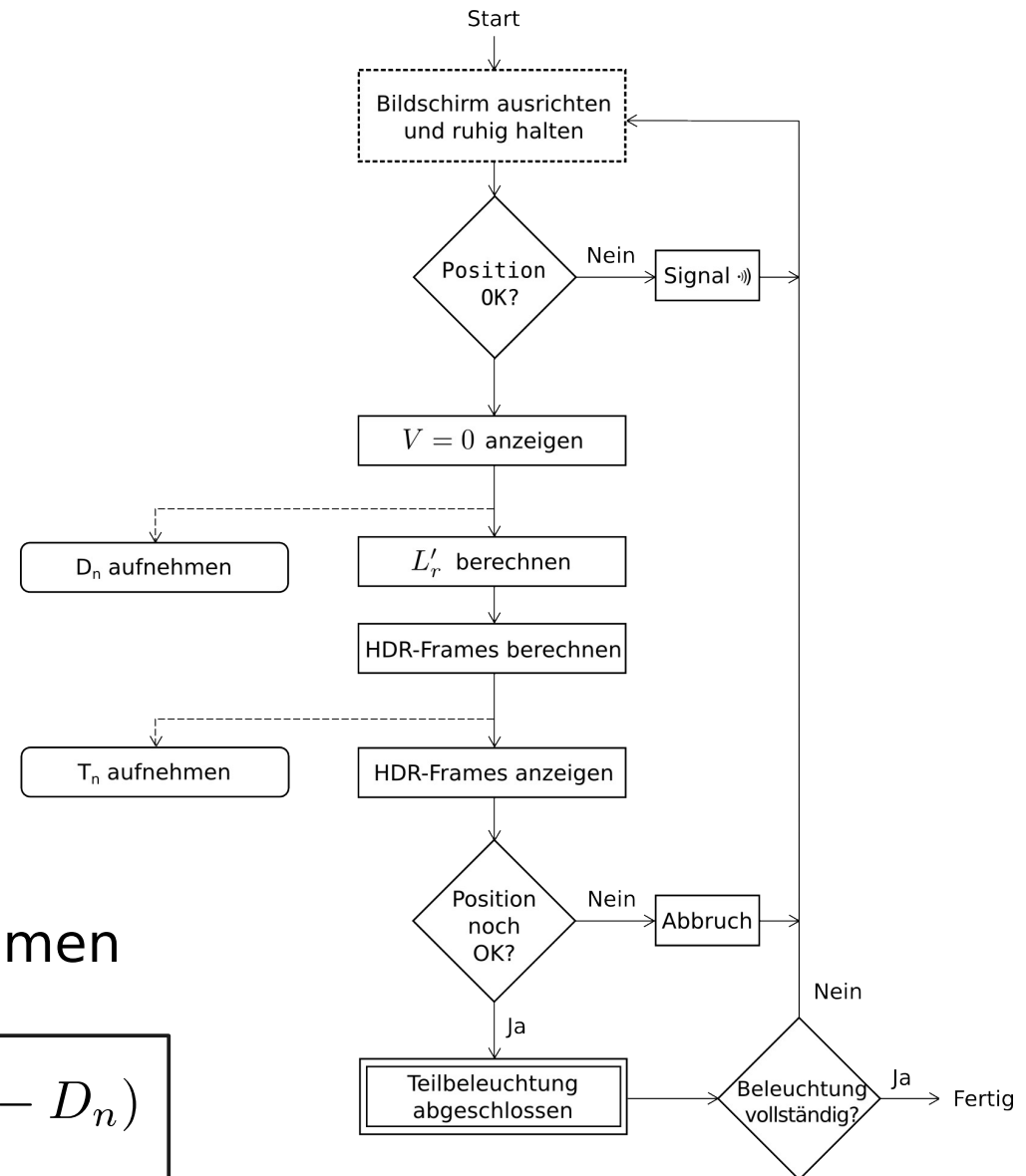


Vollständige Beleuchtung

- Position überprüfen
 - Abstand ($\pm 10\%$)
 - Winkel ($\pm 5^\circ$)
 - Verwackler, Drift
 - Überlappung
- Phase 1
 - Frames berechnen
 - Darkframe D_n aufnehmen
- Phase 2
 - Frames anzeigen
 - Teilbeleuchtung T_n aufnehmen

• Endergebnis:

$$T = \sum_n s_n (T_n - D_n)$$



Details

- Software
 - C++ und OpenCV ^[10]
 - Alle Berechnungen auf CPU
 - OpenGL zum Anzeigen
- Konfiguration
 - Cube-Map 6x1000x1000 Pixel
 - Bildschirmauflösung 1320x720 Pixel
 - 20 HDR-Frames

Durchschnittliche Laufzeiten	
Projektion P (Cube-Map auf Bildschirm)	64.32 ms
Projektion P^{-1} (Bildschirm auf Cube-Map)	77.37 ms
HDR-Algorithmus	796.08 ms
Positionsberechnung	4.82 ms

Ergebnis

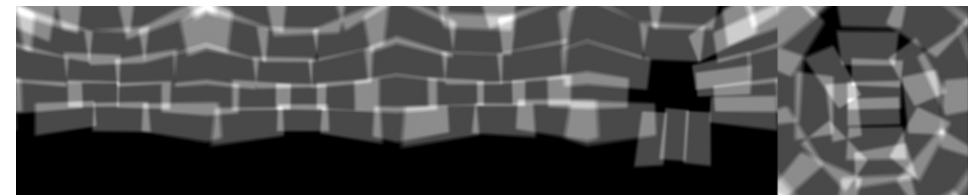
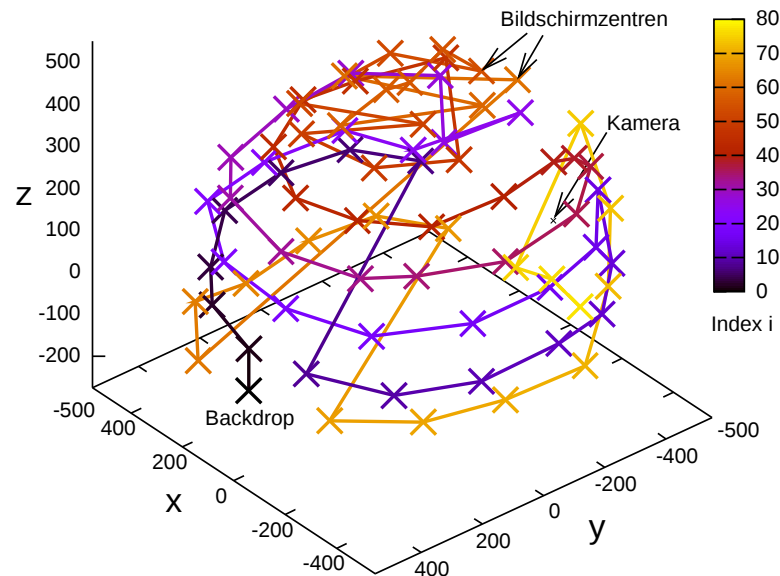
- Chromobjekt (Ø6 cm)
- 50 cm Bildschirmabstand
- 20 Frames (LDR-Beleuchtung)



Grace-Cathedral (Quelle: Hi-Res Light Probe Gallery [9])

Ergebnis

- Chromobjekt (Ø6 cm)
- 50 cm Bildschirmabstand
- 20 Frames (LDR-Beleuchtung)
- 78 Teilbeleuchtungen
 - 95 Minuten
 - 73 Sekunden pro Position



Ergebnis

Artefakte:

A: unerreichbare Positionen

B: DSLR-Kamera

C: Reflexion der Fiducials

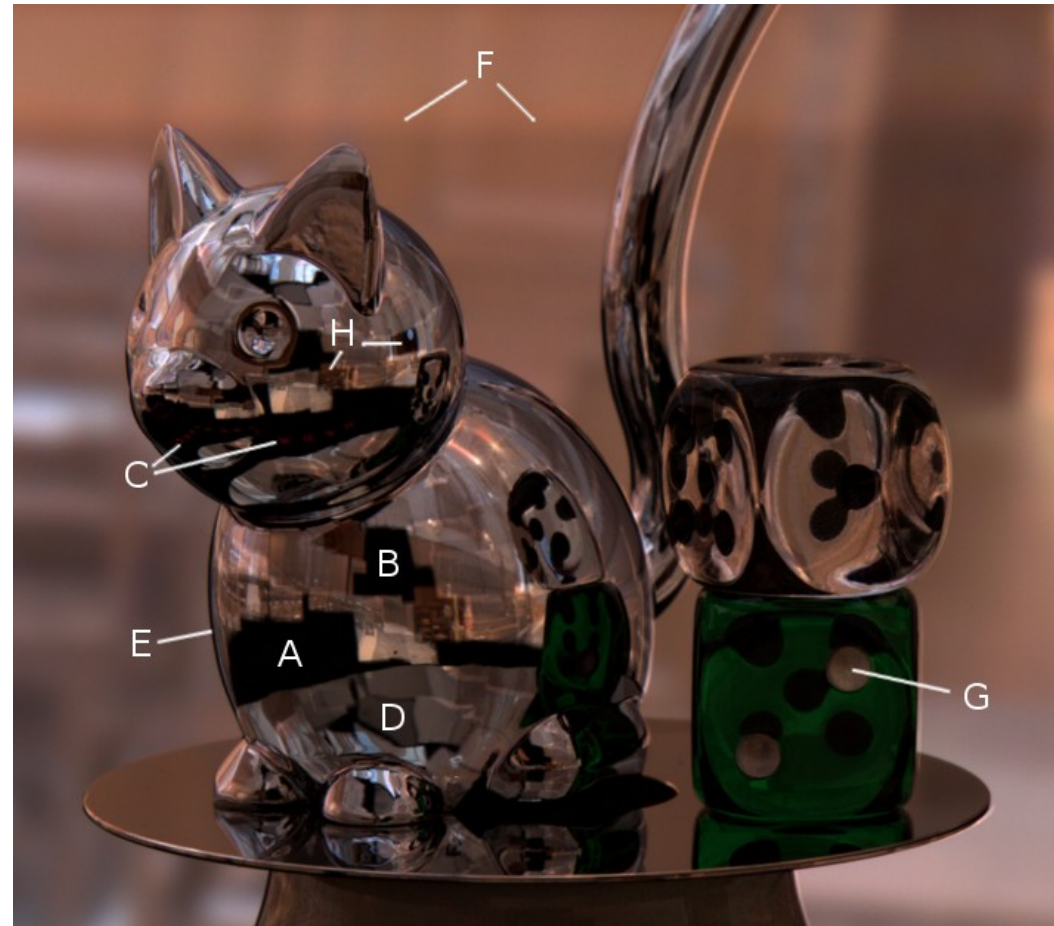
D: Verwackler / Drift

E: DSLR hat sich bewegt

F: Überlappingsartefakt

G: Dynamikbereich der
DSLR zu gering

H: Shutter-Lag



Zusammenfassung

- Tracking-Stage
 - Positionsbestimmung im Dunkeln
 - Mehr als die obere Halbkugel erreichbar
- Bildschirmpixel als Lichtquellen
 - Per-Pixel-Ansprechverhalten
 - LDR-Beleuchtung
- HDR-Sequenz
 - Beliebige Kontrasterhöhung möglich
 - In der Praxis nur eingeschränkt anwendbar
- Zusammenhängende Beleuchtung
 - Überlappungsbehandlung funktioniert
 - Einschränkung durch Tracking-Genauigkeit

Ausblick

- Radiometrisches Modell: Lichtaustrittswinkel beachten
 - Mehr Freiheit beim Beleuchten
 - Größerer Kalibrierungsaufwand
- HDR-Beleuchten in Echtzeit
 - Berechnung auf GPU
 - DSLR im Bulb-Mode
 - Bildschirm frei um die Szene bewegen
 - Aufnahme von Darkframes nicht möglich
 - LED-Bildschirm
 - Lichtfreier Raum

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?

Demo!

Quellen

- [1] Lichtzelt. Wikimedia Commons, Author: Alison Christine
URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_Tent_DIY.jpg
- [2] P. Debevec, A. Wenger, C. Tchou, A. Gardner, J. Waese, T. Hawkins. A Lighting Reproduction Approach to Live-action Compositing. *ACM Trans. Graph.*, S.547–556, 2002.
- [3] B. Lamond, C.-F. Chabert, P. Einarsson, A. Jones, W.-C. Ma, T. Hawkins, M. Bolas, S. Sylwan, P. Debevec: Relighting Character Motion for Photoreal Simulations. *Technischer Bericht, DTIC Document*, 2006.
- [4] P. Debevec, T. Hawkins, C. Tchou, H.-P. Duiker, W. Sarokin, M. Sagar. Acquiring the Reflectance Field of a Human Face. *In Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '00*, S. 145–156. 2000
- [5] V. Masselus, P. Dutré, F. Anrys. The Free-form Light Stage. *In ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, SIGGRAPH '02*, S. 262–262. (2002)
- [6] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto, K. Tachibana. Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment. *In proceedings of the International Symposium on Augmented Reality*, pp.111-119, (2000)
- [7] ARToolKit Homepage. URL: <http://artoolkit.sourceforge.net/>
- [8] M. Robertson, S. Borman, R. Stevenson. Dynamic range improvement through multiple exposures. *In Image Processing, 1999. ICIP 99, Band 3*, S. 159–163 vol.3. 1999.
- [9] High-Resolution Light Probe Image Gallery. URL: <http://gl.ict.usc.edu/Data/HighResProbes>
- [10] OpenCV - Open Source Computer Vision Library. URL: <http://opencv.org>