



Geometrische Kalibrierung von Range Cameras

Willi Karel

wilfried.karel@geo.tuwien.ac.at

Forschungsgruppe Photogrammetrie

Department für Geodäsie und Geoinformation

Technische Universität Wien

www.ipf.tuwien.ac.at

Inhalt

- Range Imaging – Einführung
- Distanzfehler von PMD-Range-Kameras
- Kalibrierung lokal korrigierbarer Fehler
- Scattering-Kalibrierung

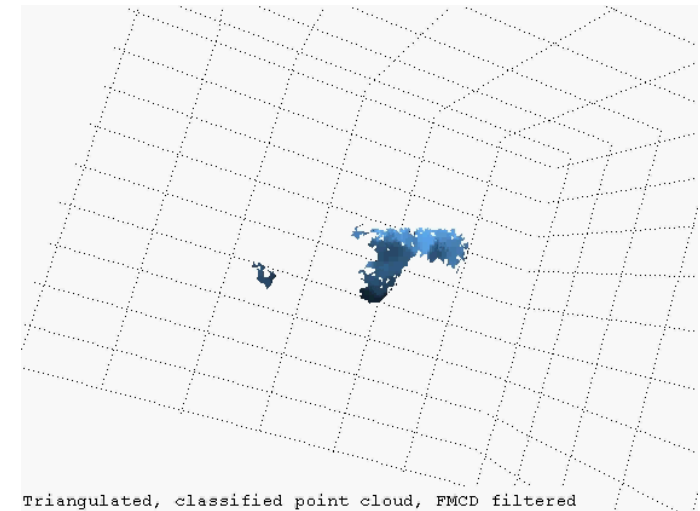
RANGE IMAGING – EINFÜHRUNG

Range Imaging als Kombination von Vorteilen

Photogrammetrie

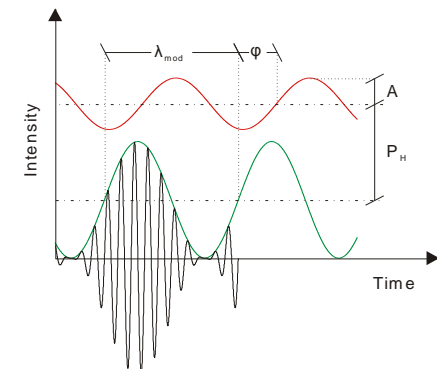
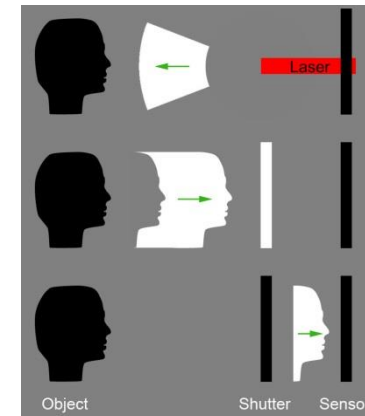
Laserscanning

- **Flächenhafte, simultane, robuste** Distanzbestimmung über **Laufzeitmessung** eines emittierten Signals
 - Geeignet für **kontrastarme Oberflächen**
 - **Keine homologen Punkte** nötig
- **Keine bewegten Teile**
- **Niedriger Strombedarf**
- **Leicht, kompakt, mobil**
- **Kostengünstig**
- **Vektorbündel**
 - Erleichtert indirekte Orientierung auf bewegten Plattformen
 - Simultane Erfassung dynamischer Objekträume



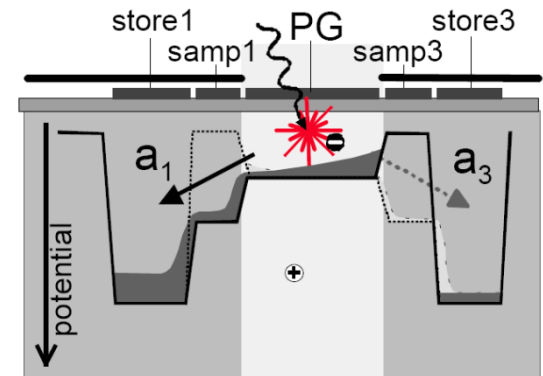
Verfahren der Distanzbestimmung

- $d = \frac{1}{2} c t$
- Allgemein:
 - NIR
 - Amplitudenmodulation
- Gepulste Modulation
 - Lawinenphotodioden: APD
 - APD im Geiger-Modus: SPAD
 - Mehrfache Kurzzeit-Doppelbelichtung: MDSI
- Kontinuierliche (CW-) Modulation (Photomischdetektor, PMD)
 - Heterodyne Mischung
 - Homodyne Mischung



In Serie: PMD-Sensoren

- Photonen \rightarrow p-Silizium \rightarrow Elektronen-Loch-Paare
- Elektronen \rightarrow elektrisches Feld moduliert mit Referenzsignal \rightarrow Integration in 1 von 2 Kondensatoren „Elektronenschaukel“
- Referenzsignal = LED-Signal + $\{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$
 \rightarrow Korrelationsfunktion \rightarrow Phasenwinkel
- Kein kohärentes, kein monochromatisches Licht nötig, nur bis zu 30 MHz \rightarrow günstige LEDs verwendbar, kein hochgenauer Frequenzgeber nötig



PMD: typ. techn. Daten

Swissranger SR-3000

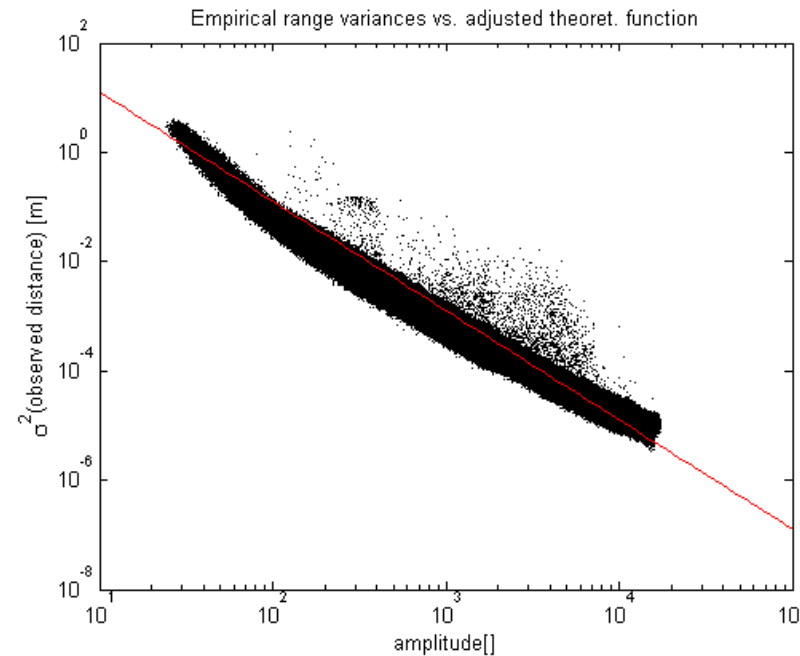
Bildmatrix	144x176px ²	Modulation	5-30MHz
Blickfeld	39.6°x47.5°	Eindeutigkeitsbereich	30-5m
Max. Bildrate	25 fps	Abmessungen	50x67x42.5mm ³
Beleuchtung	1W	Gewicht	162g
Trägerwelle	850nm	Brennweite	8mm



Präzision: \cong cm Genauigkeit \cong dm

DISTANZFEHLER VON PMD-RANGE- KAMERAS

PMD: Zufällige Distanzfehler

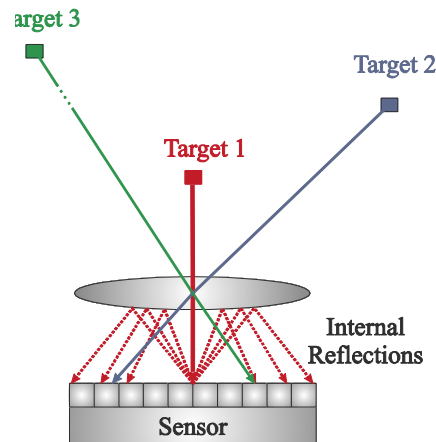
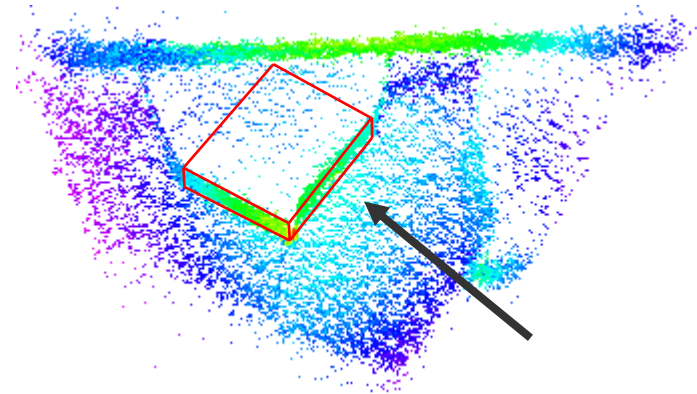


Empirisch bestimmte $\sigma^2_{\text{obsDist}}$ vs. mittl. Amplitude

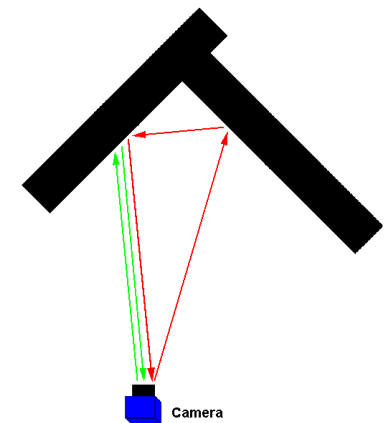
$$\sigma^2_{\text{obsDist}} \sim 1/A^2$$

PMD: Systematische Distanzfehler

- Lokale Fehler:
 - Distanz selbst (nichtlinear)
 - Position am Sensor
 - Amplitude
 - Reflektivität / Material
 - Integrationszeit
 - Interne / Umgebungstemperatur
 - Inzidenzwinkel
 - Zeitliche Drift
- Nicht-lokale (Mehrweg-) Effekte:
 - Intern (Scattering)
 - Extern (Multipath)
- Gegenseitige Abhängigkeiten unklar



Scattering
vgl. Blendenflecke (lens flare)



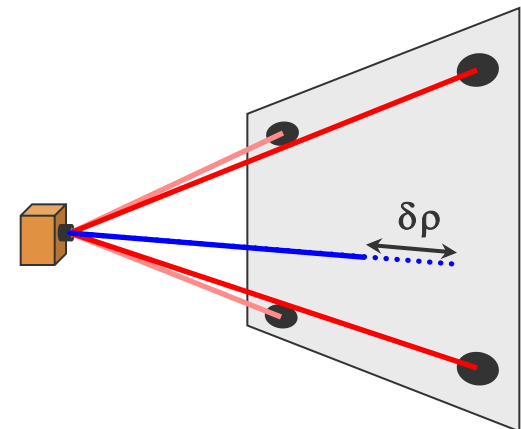
Multipath

W. Karel, Prof. N. Pfeifer

KALIBRIERUNG LOKALER FEHLER

Distanz-Kalibrieransatz

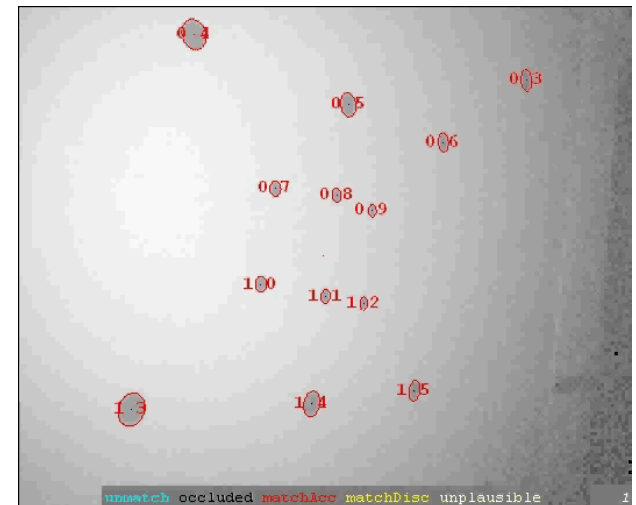
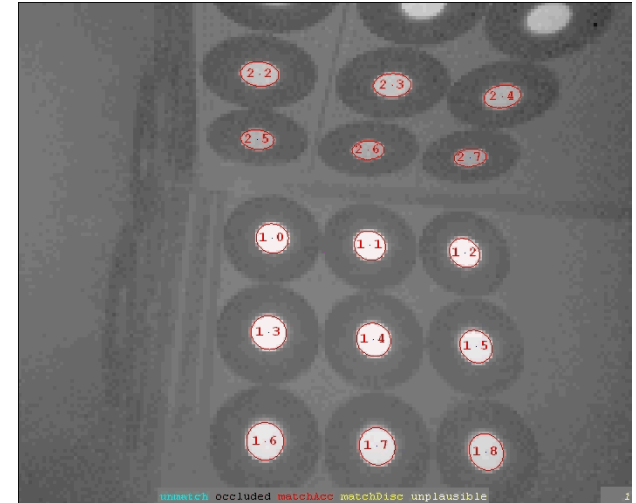
- Selbstkalibrierung: Nachweis unabhängiger Parameter / Modellwahl / Parameterschätzung aller Einflussgrößen auf Basis eines einzigen Datensatzes
- Amplituden weisen geringeres Rauschniveau auf und sind lokal geringer deformiert
- Laterale Auflösung sehr niedrig (Sensormatrix) → sparsame Verwendung des Bildraumes → kreisförmige, nicht kodierte Zielmarken
- Ebenes Testfeld: kein Multipath, geringes Scattering
- Bündelblockausgleichung → IOR & EOR
- EOR → Maskierung des Testfeld-Bereiches: verwende nur Bereiche auf Testfeld außerhalb Zielmarken → Distanzresiduen
- Prüfe Residuen auf Zusammenhang mit möglichen Einflussfaktoren (Modellwahl visuell, Parameterschätzung durch Ausgleichung)



Kalibrierung mittels Range-Videos

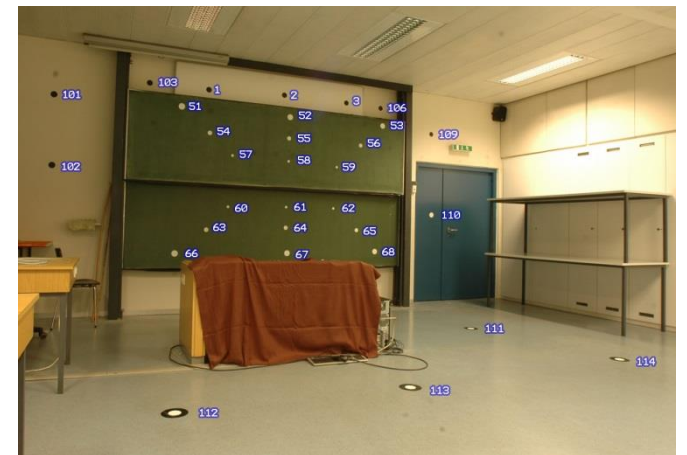
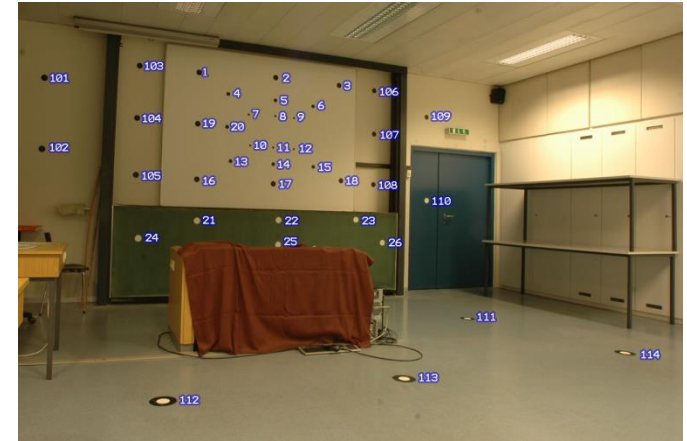
Relativ niedrige laterale vs. rel. hohe zeitliche Auflösung: 25kPixel vs. 25fps

- Verwende Bildsequenzen
- Handgeführte Bedienung → permanente, zufällige Bewegungen, dichtes Sampling des Parameterraumes
- Automatische Zielmarkenverfolgung
- Tausende Einzelbilder
- Nur Distanzen $< 2.5\text{m}$ wegen:
 - $A \sim 1/d^2$
 - Bewegungsunschärfe (Rotationen)

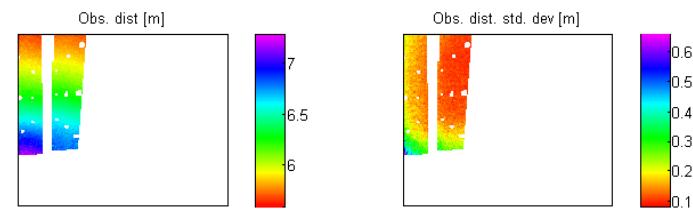
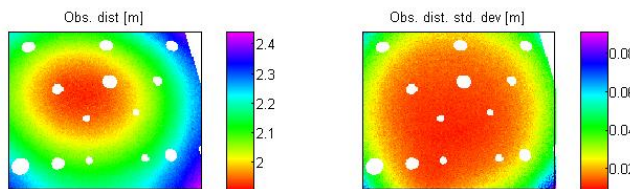
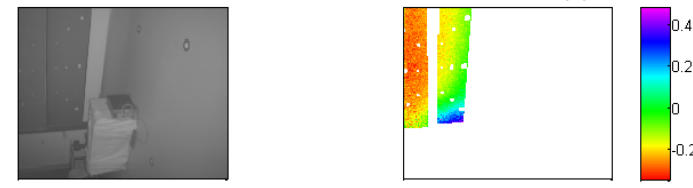
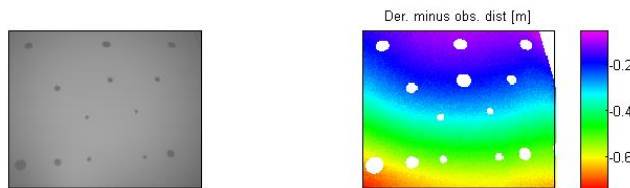
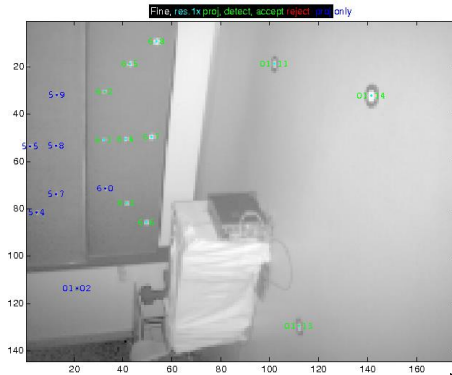
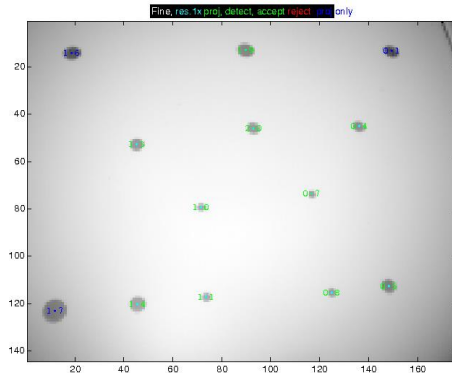


Kalibrierung mit Standbildern

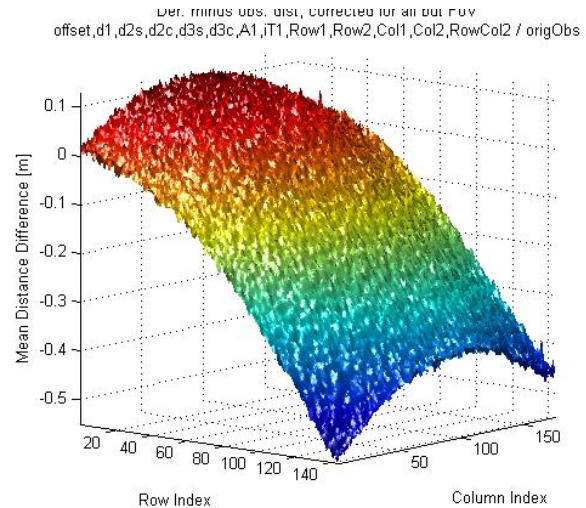
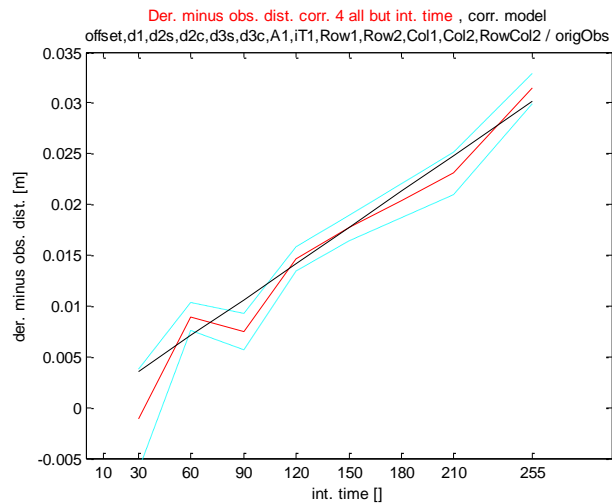
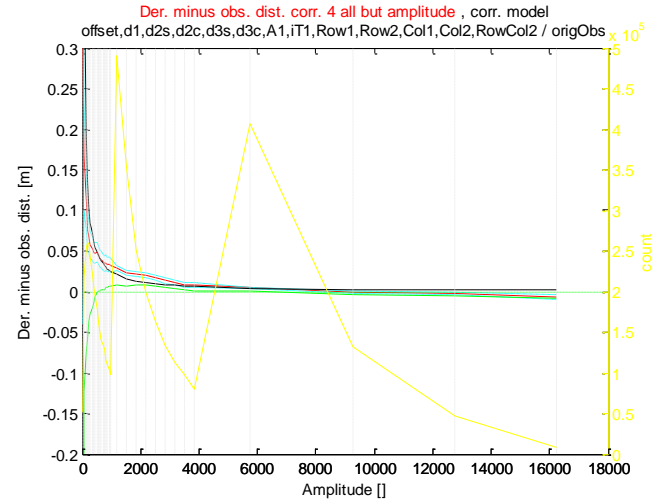
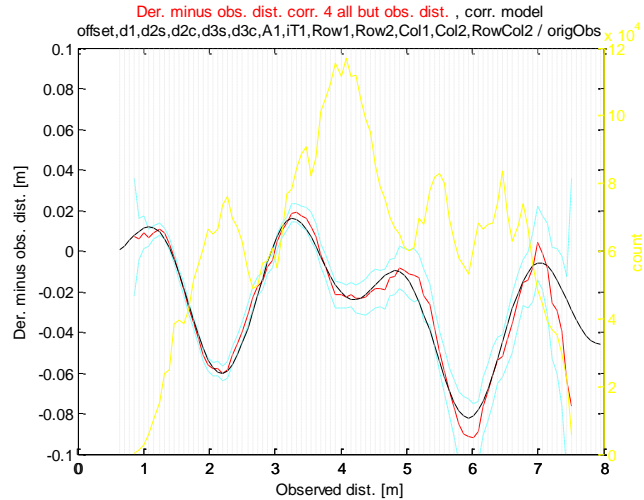
- Mittelung tausender frames mit EOR=const zu „Standbild“ → geeignet für gesamten Distanzmessbereich
- Automatische Zielmarkendetektion und Orientierung
- Suche nach Korrespondenzen: rechenaufwändig (keine Kodierung)
- 850 „Standbilder“: jeweils unterschiedliche Integrationszeit und/oder Orientierung → Amplituden, Objektdistanzen, Position am Sensor
- 2 Testfelder mit unterschiedl. Reflektivitäten → Trennung Amplitude/Objektdistanz



Orientierung, Maskierung, Residuen der Standbilder



Modellauswahl, Parameterschätzung

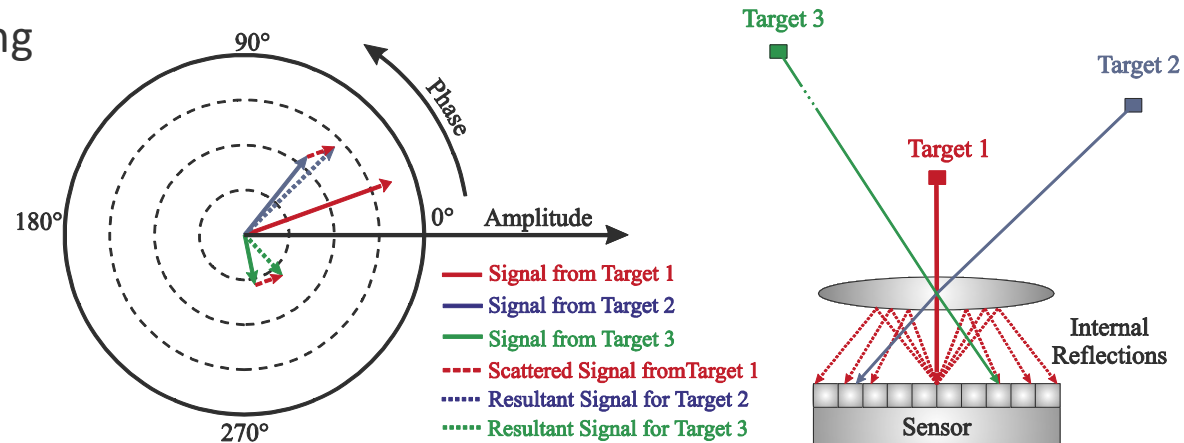


W. Karel, S. Ghuffar, Prof. N. Pfeifer

SCATTERING-KALIBRIERUNG

Scattering

- Interne Reflexionen
- Beobachtet: Mischung aus fokussiertem und gestreutem Licht
- Unterstützt durch hohen Bildkontrast – aktive Beleuchtung
- Modell: Addition in komplexer Ebene?
 - Unter Annahme: sinusförmiges Signal
- Kontraintuitive Distanzmessungen möglich (phase wraps)
- Untersuche die Natur des Scattering
 - Möglichst frei von Annahmen
 - Ohne (lokaler) Kalibrierung
 - Einflussfaktoren?
 - Integrationszeit?
 - Amplitude?
 - Distanz?
 - Position am Sensor?
- Scattering-Kalibrierung



Methodik

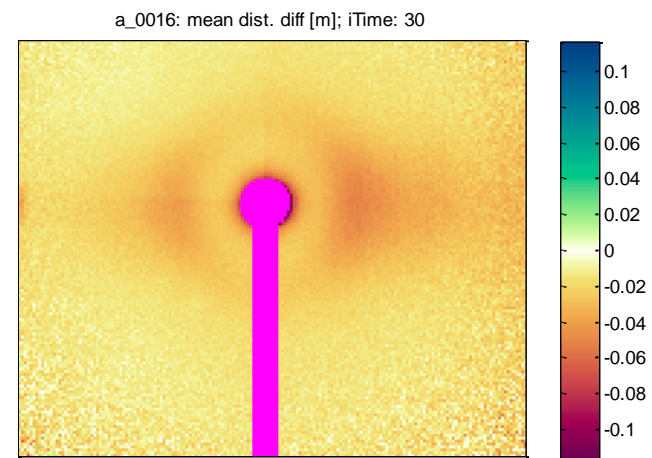
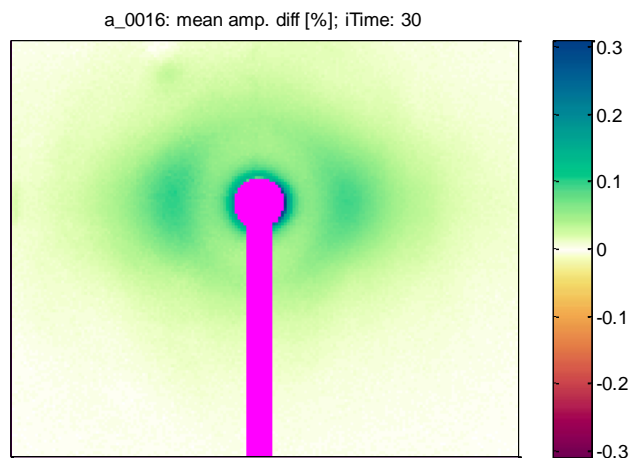
- Hintergrundsubtraktion
 - Frames mit / ohne Vordergrundobjekt
 - Variiere zu untersuchende Parameter
 - Hintergrund
 - Schwarzer Karton
 - Vordergrund
 - Kreisförmige, weiße Zielmarken aus Karton
 - Montiert auf vertikalem Stab / Stativ
 - Maskiere Bereiche des Stabs & Halbschatten (nicht-punktförmige Lichtquelle), untersuche den restlichen Bildbereich
- 2 Typen der Differenzbildung:
 - **Separate Differenz** von Amplitude & Distanz → **Beobachtungsfehler**
 - **Differenz der komplexen Signale** → **Fehlersignal**
- Hohes Rauschniveau
 - Statische Szenen und fixierte EO
 - Mittelung von 1000 frames, pixelweise

Scattering Experimente

- Standardwerte:
 - Hintergrund: Normalfall, 1.46m zur Kamera
 - Zielmarke zentriert auf Hauptpunkt, Normalfall, Radius 20mm, 1.15m zur Kamera
 - Integrationszeit: 30 [8b]
 - Raum abgedunkelt, Zimmertemperatur
- Variation von
 - **Integrationszeit** = 30, 60, 90 [8b]
 - **Zielmarkengröße**: Radius = 20, 30, 40mm
 - **Distanz, mit konstanter Zielmarkengröße im Bild**:
Distanz = 4/4, 3/4, 2/4
Radius = 40, 30, 20mm
Untersuche den Einfluss von Distanz, unabhängig von der Zielmarkengröße / Amplitude
 - **Position am Sensor**

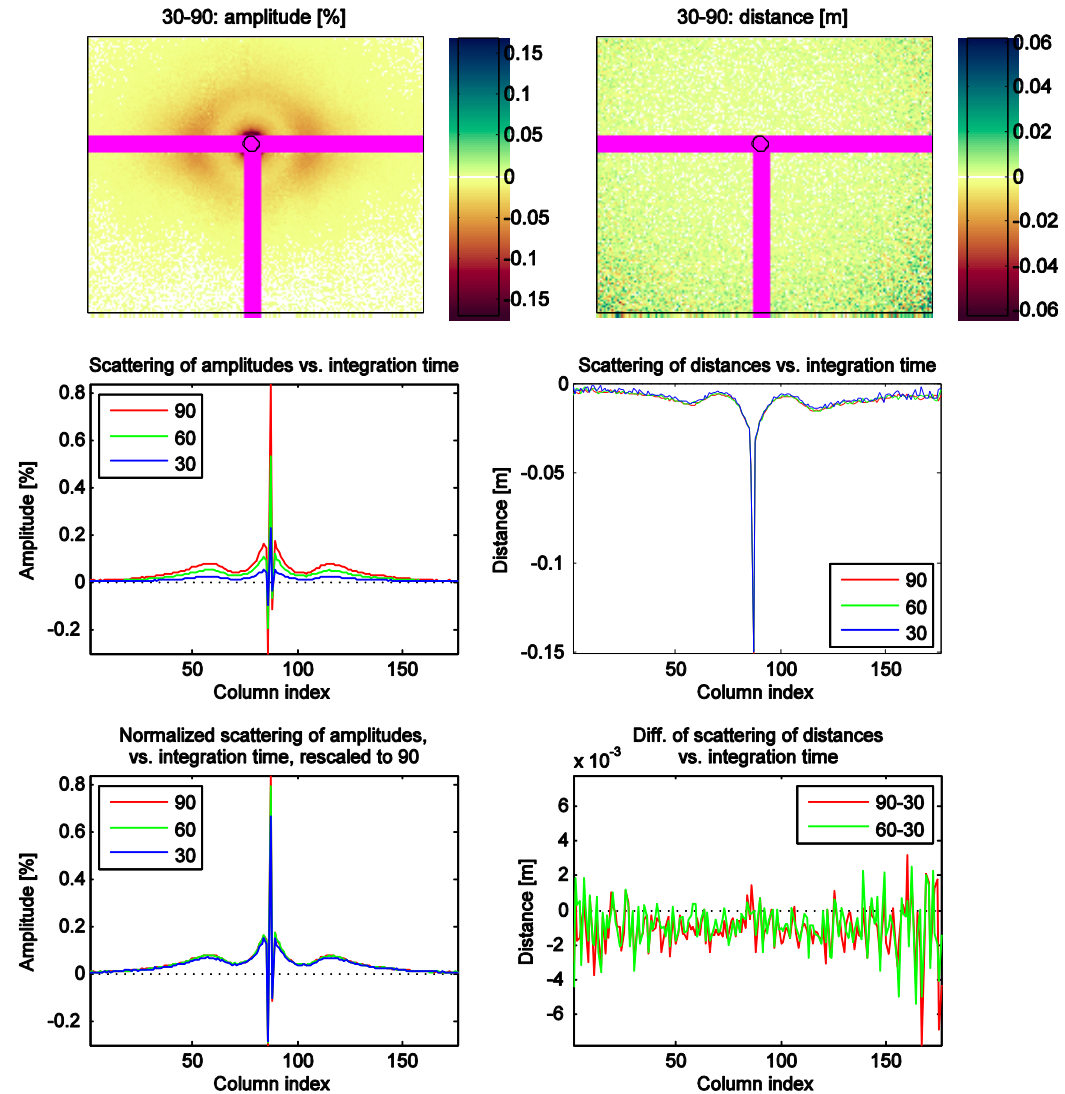
Generelles Scattering Muster

- Separate Differenz: Scattering vorhanden in beiden Kanälen
- Lichthof: Nicht rotationssymmetrisch
- Stab: Maskiert (magenta)
- Hauptpunkt: Exzentrisch



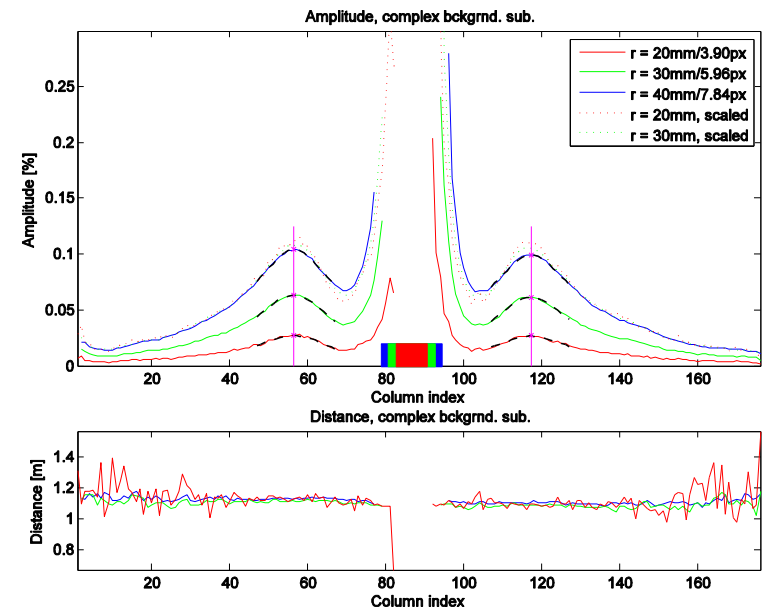
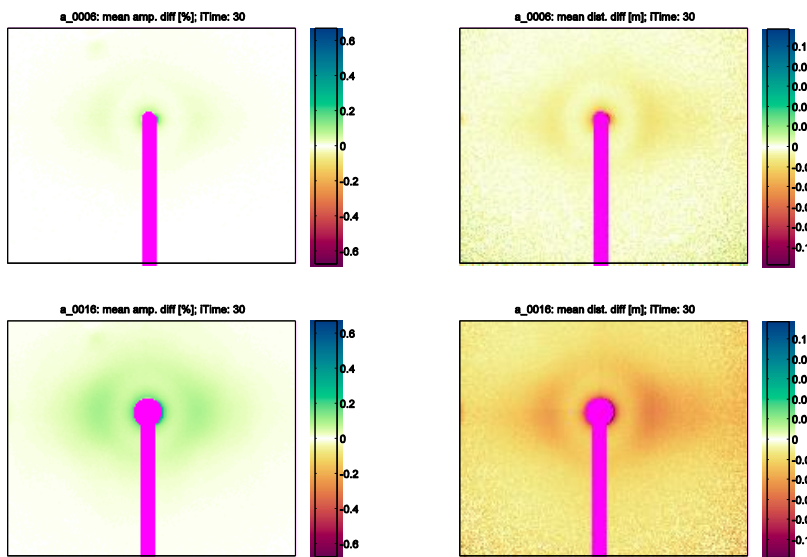
Variation der Integrationszeit

- Optisches Signal unbeeinflusst von Integrationszeit
- Aber: beobachtete Amplitude schon!
- Kein Einfluss auf Distanzbeobachtungen
- Linearer Einfluss auf Amplitudenbeobachtungen, konform mit Theorie
- Separate Differenz



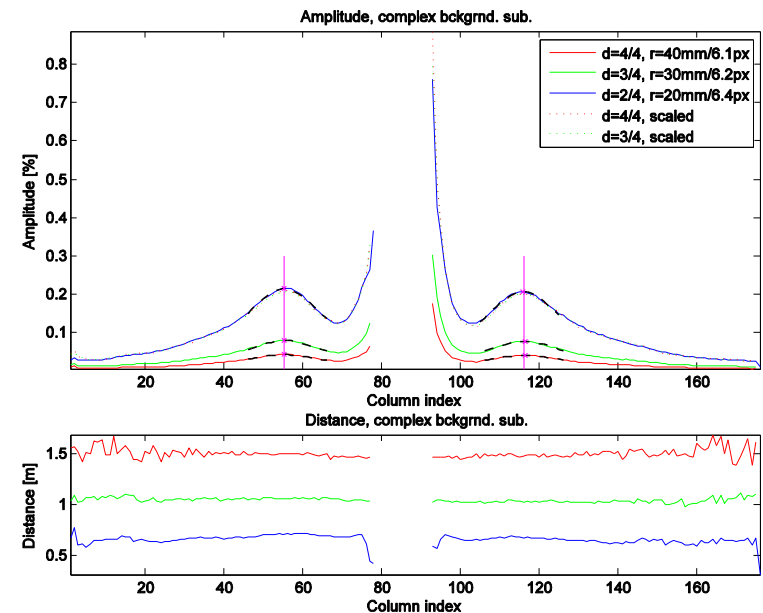
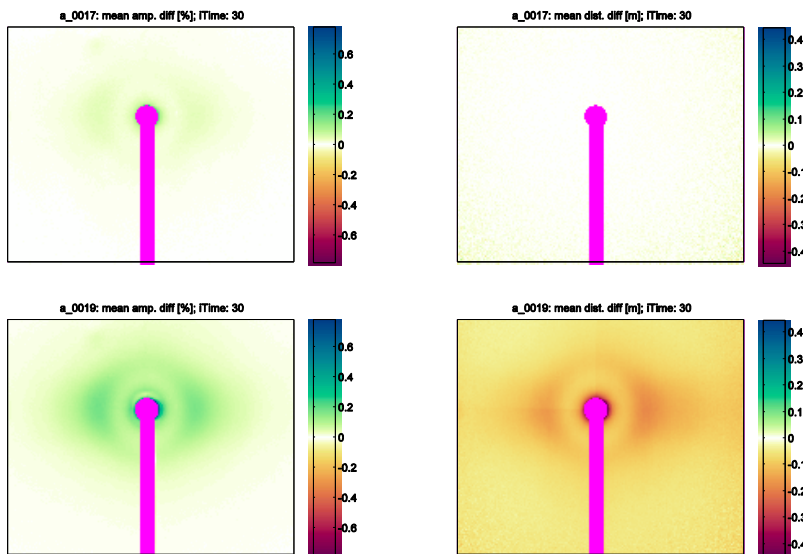
Variation der Zielmarkengröße

- Größerer Zielmarkendurchmesser → Größere Magnitude
- Komplexes Signal:
 - Phasenwinkel konstant
 - Amplitude:
 - Distanz zwischen Maxima der seitlichen Flügel = konstant
 - Signal abgeflacht
 - Verhältnis der Maxima zur Fläche der Zielmarken im Bild = konstant



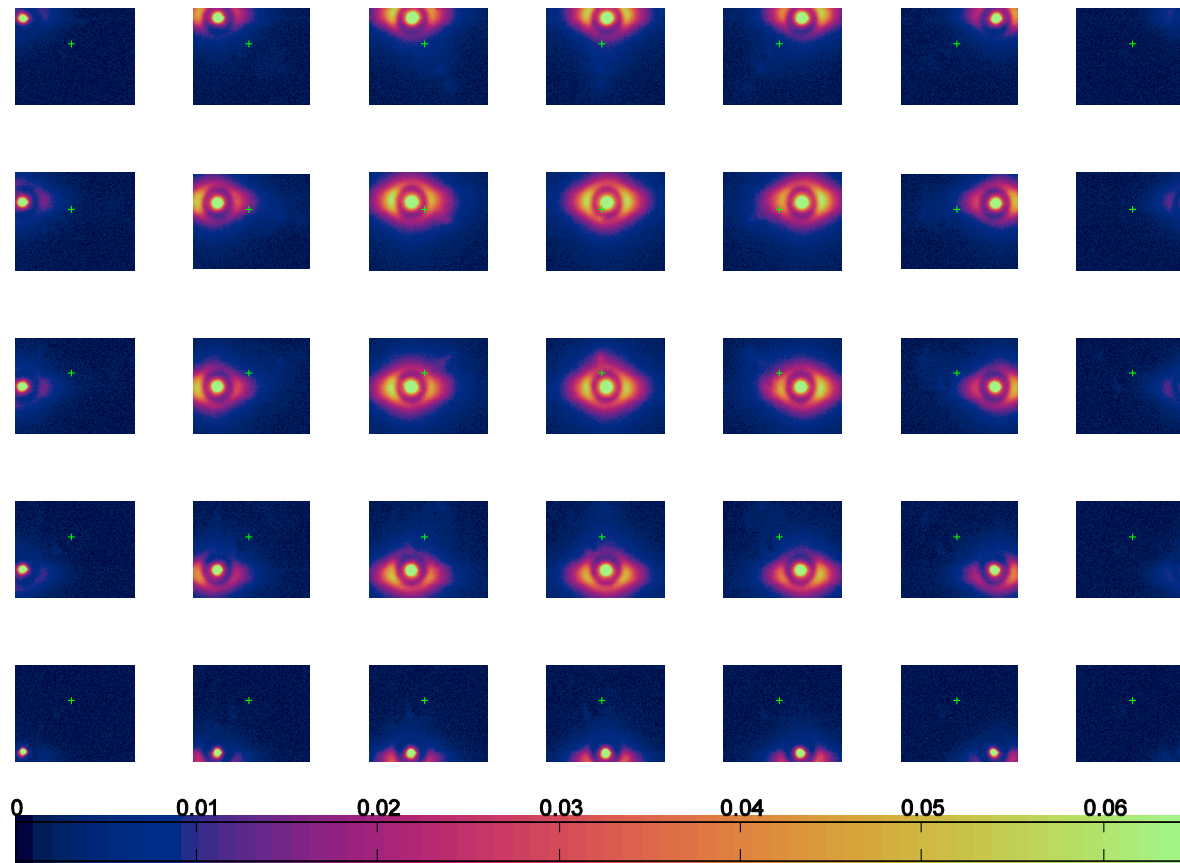
Var. Distanz, mit konstanter Zielmarkengröße im Bild

- Separate Differenz (links):
 - Einfluss in beiden Kanälen
- Komplexe Differenz (rechts):
 - Phasenwinkel
 - konstant, geben nominelle Distanz wieder
 - Amplituden:
 - Distanz zwischen Maxima = konstant → interner Effekt!
 - Skalierte Amplituden überdecken sich recht genau



Variation der Position am Sensor

- Komplexe Subtraktion (Amplituden)
- Nicht invariant bzgl. Position am Sensor!
- Radialsymmetrisch bzgl. Hauptpunkt

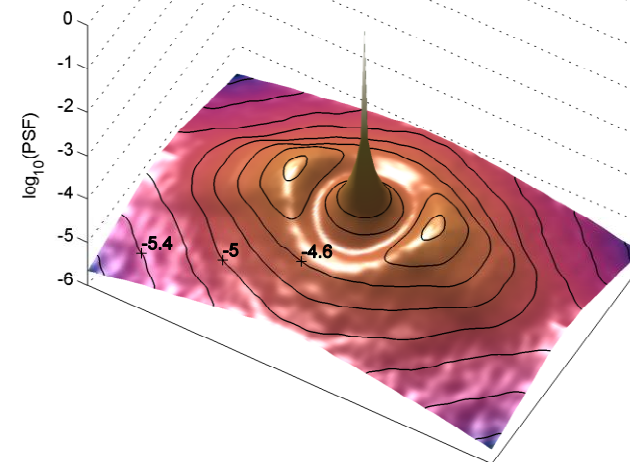
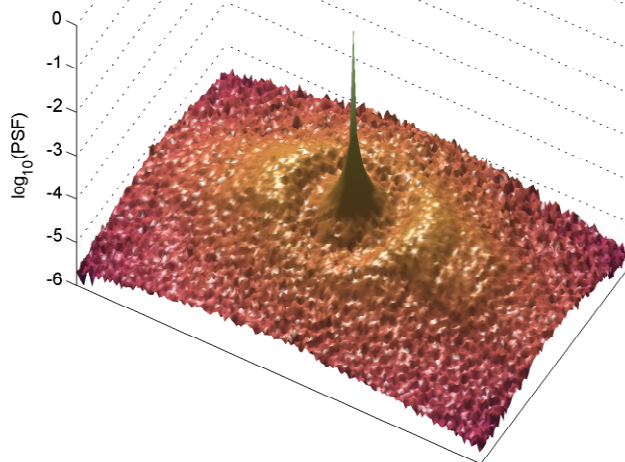


Schlussfolgerungen

- Wichtigste Ergebnisse der Versuche:
 - Methoden zur Erstellung präziser Scattering-Daten
 - Einfluss der Integrationszeit eliminiert
 - Phasenwinkel = konstant bei variierender Amplitude
 - Experimente deuten darauf hin, dass
 - Scattering linear in der Amplitude und additiv in der komplexen Interpretation des Signals
 - Interner Effekt
 - Nicht positionsinvariant

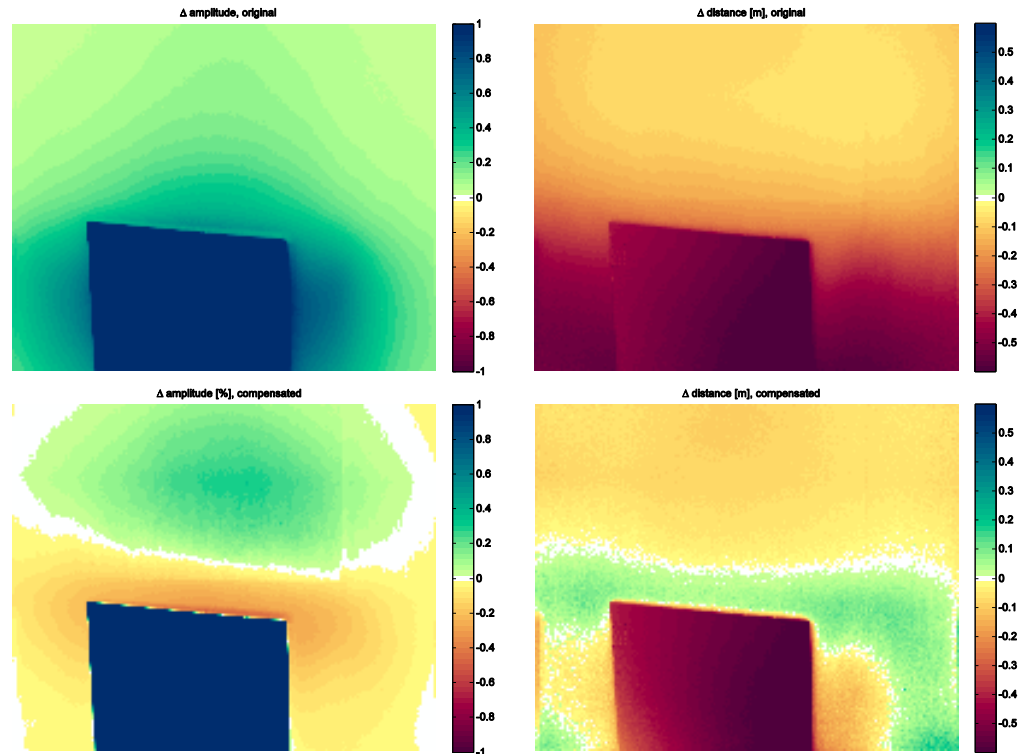
Punktspreizfunktion

- Nicht-aufgelöste Zielmarke
- Genauestmögliche Beobachtung am Hauptpunkt: 60h
- Modellierung der Verformung abseits dessen
- Schwierige Bedingungen: mögl. Hohes SNR in den Ecken, aber Überbelichtung im HP vermeiden
- Annahme: $\sum \text{Amplitude} = 1$
- 63% fokussiertes Licht; 8-Nachbarpixel: 1,4‰; 72% innerhalb Lichthof (r=19px); seitl. Maxima: 0,07‰



PSF: Anwendung

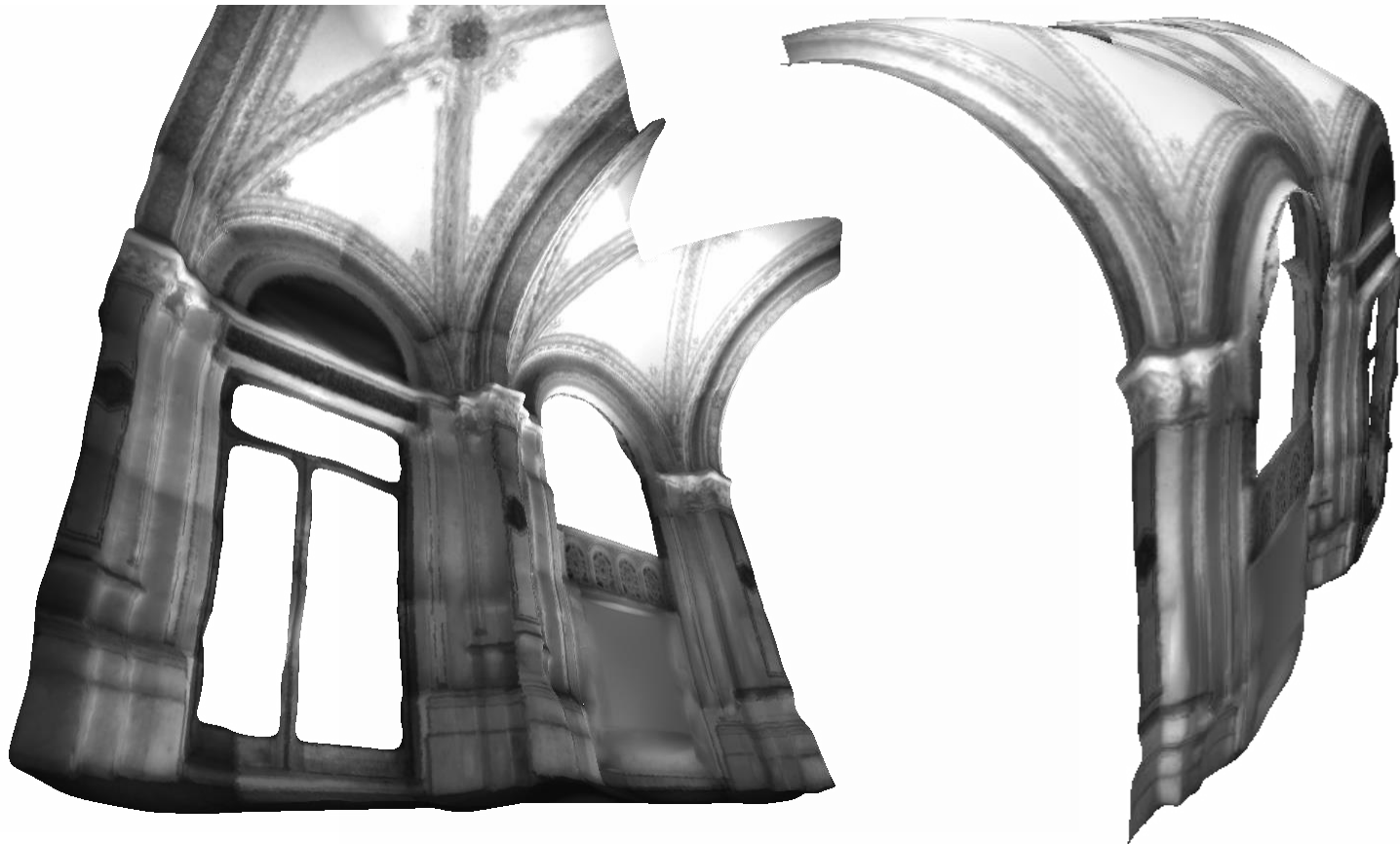
- $g = f * h + \eta$
- Inversion: Richardson-Lucy:
 - $\hat{f}^{(n+1)} = \hat{f}^{(n)} \left(\frac{g}{\hat{f}^{(n)} * h} * h^T \right)$
- Reduktion RMSE Distanzen
 - Räuml. variante PSF: 73%
 - Räuml. invariante PSF: 69%



RIM-ANWENDUNG

Modell der hist. Passage „Palais Ferstel“, Wien

- Diplomarbeit Stefan Niedermayr



Ende

