

Dipl.-Ing. Rico Nestler / PD Dr.-Ing. K.-H. Franke

Pixonenbasierte Restauration digitalisierter Fotoplat- ten

1 Einleitung

Astronomische Himmelsüberwachungsaufnahmen werden gewöhnlich mit der Zielstellung gemacht, die aufgenommenen stellaren Objekte nach der Klassifikation auch fotometrisch und astrometrisch zu beurteilen. Abhängig von den Mechanismen der Bildentstehung ist der Informationsgehalt der verfügbaren Messdaten zumeist stark beschränkt und infolge stochastischer Schwankungen in vielen Bildregionen nur unsicher. Beispiele sind die Auflösungsreduktion durch geometrische Abbildungsfehler des optischen Instrumentes oder die Verzerrung des Signalwertebereiches durch nichtlineare Bildempfänger. Liegt derartig gestörtes Bildmaterial vor, so ist der Einsatz kommerzieller Softwarepakete zur automatischen Bildauswertung wenn überhaupt nur mit sehr großem Parametrierungs- und Einrichtaufwand möglich und die erzielten Resultate bedürfen in vielen Fällen nachträglich einer manuellen Korrektur. Es ist daher zu überlegen, ob das Einfügen eines Restaurationsschrittes vor der weiteren Verarbeitung und Archivierung des Bildmaterials Vorteile erbringen kann.

Dieser Beitrag dokumentiert Ergebnisse eines vom Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur geförderten Projektes (Projektnr.: B 611-00023).

2 Pixonenbasierte Restauration

Für die Verwertbarkeit eines Restaurationsergebnisses ist neben der Beseitigung der deterministischen Einflüsse bei der Bildentstehung vor allem die Vermeidung typischer Restaurationsartefakte entscheidend. Wird die Bildentstehung durch den allgemeinen Operator $\mathcal{H}\{\}$ dargestellt, der das ursprüngliche Bildsignal f in die der Messung zugänglichen Daten g überführt, so ist die Bildrestauration durch den umgekehrten Vorgang $g \rightarrow \tilde{f} : \tilde{f} = \mathcal{H}^{-1}\{g\}$ beschrieben. Die schlechte Konditionierung dieser Operation führt wegen des vorhandenen Bildrauschens zu Artefakten in der Lösung. Anders ausgedrückt, ist die durch den Definitionsbereich der Lösung vorgegebene Anzahl beschreibender Freiheitsgrade¹ nicht in jeder Bildregion allein durch die Bildinformation der auflösungsbegrenzten Daten zu beschränken. Die Artefaktvermeidung setzt demnach voraus, zum strukturellen Aufbau des restaurierten Bildes im wesentlichen nur die signifikante Information der Messdaten zu verwenden. Aus diesem Grund ist ein Restaurationsverfahren erforderlich, das eine der regionalen Informationsdichte entsprechende Regularisierungskomponente besitzt. Die Grundlage für das hier vorgestellte Verfahren bildet die Pixonenmethode [1], ein neueres Verfahren zur Regularisation inverser Probleme. Das Prinzip der Pixonenmethode ist es, die Freiheitsgrade der Lösungsbeschreibung (Bildmodell) so zu beschränken, dass dessen Komplexität nicht größer ist, als zum Erreichen einer ausreichend datenkonsistenten² Lösung erforderlich. Das zugehörige Pixonenbildmodell besteht aus Bildelementen variabler Größe und Form (Pixonen), deren Auswahl angepasst an die erforderliche Strukturiertheit der Lösung erfolgt. Diese Form der Bildbeschreibung ist aufgrund der Fähigkeit, sowohl relevante Bilddetails darzustellen

¹Pixelanzahl

²Eine Lösung ist dann datenkonsistent, wenn diese unter Berücksichtigung eines Modells zur Beschreibung der Bildentstehung die vorliegenden Messdaten nachbildet. Der zugehörige Prädiktionsfehler $e = \sum_i (g - \hat{g})_i^2 = \sum_i R_i^2$ ist in diesem Fall minimal.

und zugleich die Modellkomplexität in Regionen geringer Informationsdichte stark zu beschränken, besonders für astronomische Bildinhalte geeignet.

Um von den vorliegenden Messdaten g auf die gesuchte Lösung f zu schließen, bedarf es einer Beschreibung des Vorgangs der Datenentstehung über ein Bildformationsmodell. Es dient im Rahmen des Restaurationsansatzes als Datenprädiktor $\tilde{g} = \mathcal{H}^+\{\tilde{f}\}$ zur Bewertung der Datenkonsistenz eines Lösungsvorschlags \tilde{f} . Das spezifische Bildformationsmodell $\mathcal{H}^+\{\}$ des vorliegenden digitalisierten Plattenmaterials berücksichtigt alle Stufen der realen Bildentstehung und die dabei wirksamen Einflüsse des optischen Instrumentes sowie die Eigenschaften von Fotoemulsion und Plattenscanner (siehe Abb. 1). Aufgrund der großen Gesichtsfelder der für die Plattenaufnahmen verwendeten optischen Instrumente werden die auflösungsbegrenzenden Eigenschaften des Gesamtsystems im Wesentlichen durch geometrische Abbildungsfehler, wie z.B. Koma, Astigmatismus, hervorgerufen. Diese bewirken insbesondere im Plattenrandbereich ein regional variierendes, stark unsymmetrisches Punktbild (siehe PSF-Pixelmuster in Abb. 2, oben rechts). Durch Sektorierung des Plattenbereiches und der Bestimmung von zugehörigen repräsentativen PSF lässt sich das ursprünglich komplexe Verhalten näherungsweise durch zwei unabhängige Operationen, d.h. einer linearen Faltung mit dem repräsentativen PSF-Pixelmuster gefolgt von einer nichtlinearen Verzerrung und Skalierung des resultierenden Wertebereiches $\mathcal{NL}\{\}$, darstellen. Alle nicht beschriebenen pixelweisen Schwankungen der Messdaten um den jeweiligen Erwartungswert sind innerhalb dieses Modells das Ergebnis eines stochastischen Prozesses, der zwar weiß und normalverteilt, aber nicht stationär ist.

$$g_{\vec{r}} = \mathcal{H}^+\{f\}_{\vec{r}} = \mathcal{NL}\{h_{\text{Optik}} * f\}_{\vec{r}} \oplus n_{\vec{r}} \quad \mathcal{N} : n_{\vec{r}} \rightarrow N(0, \sigma^2(g_{\vec{r}})) \quad (1)$$

Im Rahmen des implementierten Restaurationsverfahrens mit Fuzzy-Pixonen-Ansatz werden die notwendigen Bestandteile der Lösungsbeschreibung durch ein **Bild-Modell-Paar** $\{f^P, k\}$ verkörpert. Die Synthese der Lösung f erfolgt, wie in Gl. 2 angegeben, durch Faltung des versteckten, so genannten Pseudobildes f^P , das weitestgehend unkorrelierte Signalbeiträge enthält (**Bild-Komponente** $f^P : \{f_{\vec{r}}^P\}$), mit jeweils lokalen Bildelementefunktionen. Die Reduktion des Gesamtfreiheitsgrades der Bildbeschreibung erfolgt durch Variation der lokalen Bildelementegrößen $\delta_{\vec{r}}$. Die Parametermenge der zu den jeweiligen Pixelpositionen \vec{r} gehörenden Bildelemente repräsentiert die **Modell-Komponente** $k : \{\delta_{\vec{r}}\}$. Bei der Bestimmung dieser unmittelbaren Lösungskomponenten im Rahmen eines Bayes'schen Schätzverfahrens wird eine schrittweise, adaptive Wichtung der regularisierenden Komponenten der Kostenfunktionen über den Parameter $\Omega : \{\Omega_{\vec{r}}\}$ vorgenommen. Im realisierten mehrstufigen, iterativen Lösungsschema werden alle freien Parameter der gesuchten Lösung \tilde{f}^P und \tilde{k} sowie die Regularisation $\tilde{\Omega}$ separat nacheinander bestimmt. Aufgrund der komplexen Form der resultierenden Kostenfunktionen $L = -\log(P(f^P, k, \Omega|g))$ erfolgt eine Annäherung an das gesuchte globale Minimum für jeden Parameter schrittweise und in mehreren Zyklen ³. Die Ableitung der Kostenfunktionen jedes Einzelschrittes eines Zyklus erfolgt im Kontext der Bayes'schen Parameterschätzung. Den Ausgangspunkt stellt hierbei immer der faktorisierte Ausdruck der Verbundwahrscheinlichkeit $p(f^P, k, \Omega, g)$ dar, dessen Maximalwert die gesuchte Lösung \tilde{f} charakterisiert.

$$\tilde{f}_{\vec{r}} = (\tilde{f}^P * \tilde{k}(\delta_{\vec{r}}))_{\vec{r}} \longrightarrow \max_{f^P, k, \Omega} \underbrace{\{P(f^P, k, \Omega|g)\}}_{\text{A-Posterior}} \underbrace{P(g|f^P, k, \Omega)}_{\text{Likelihood}} \underbrace{P(f^P, k, \Omega)}_{\text{Prior}} \quad (2)$$

Die für die gradientenbasierte Optimierung benötigten Bestandteile der Kostenfunktionen und ihrer partiellen Ableitungen können unter Berücksichtigung einer homogenen, geordneten Pixonenbasis aus radialsymmetrisch, gaußförmigen Bildelementen durch wiederkehrende, lineare Filteroperationen der Signalverteilungen der Lösung $f : \{f_{\vec{r}}\}$ bzw. des Residuums $R : \{R_{\vec{r}}\}$ mit den bildelementespezifischen Filterkernen der Pixonenbasis ermittelt werden.

³sogenanntes partial annealing laut [2]

Die Gesamtlaufzeit des Verfahrens wird daher neben dem Konvergenzverhalten des Optimierungsverfahrens wesentlich von der Effizienz der verwendeten FFT-Implementierung bestimmt.

3 Beispiel

Ein Vergleich der in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellten pixonenbasierten Lösung mit dem Ergebnis eines unregularisierten⁴ Verfahrens dokumentiert den qualitativen Fortschritt durch die artefaktfreie Rückgewinnung ursprünglicher Bildinformation aus den gestörten und unvollständigen Messdaten. Das symmetrische, nur gering ausgedehnte Punktbild⁵ ermöglicht es, astrometrische und fotometrische Messaufgaben präziser und ohne Berücksichtigung plattenspezifischer Eigenheiten durchzuführen. Hierbei ist insbesondere die korrekte Zuordnung der Signalbestandteile zu den stellaren Objekten der untersuchten Bildregion hervorzuheben, da diese die Voraussetzung für alle weiteren Analyseschritte, wie Objektklassifikation und die korrekte Ermittlung beschreibender Kenngrößen, darstellt. Aufgrund einer Lösungsbeschreibung, die in einem bestrahlungsproportionalen Wertebereich stattfindet, können im Gegensatz zu den nichtlinear verzerrten Messdaten aperturfotometrische⁶ Aussagen gewonnen werden. Das dafür benötigte Aperturmodell ist, angepasst an das resultierende Punktbild der Lösung, im gesamten restaurierten Plattenbereich gültig. Damit sinkt der Einricht- und Parametrierungsaufwand beim Einsatz automatischer Klassifikations- und Analyseverfahren erheblich. Die erhöhte Detektionsschwelle ermöglicht es, die Auswertung zusätzlich auf sehr lichtschwache Objekte auszuweiten.

Da die restaurierten Bilder einen erheblich geringeren Irrelevanzanteil aufweisen als die gescannten Rohdaten, können diese im Rahmen der Archivierung effizienter gespeichert werden.

Mit den heutzutage verfügbaren Rechnern beträgt die Laufzeit des implementierten Verfahrens bildgrößen- und vor allem inhaltsabhängig einige Minuten bis Stunden. Durch Ausschöpfen aller bestehenden Reserven ist es denkbar, die Restauration kompletter Fotoplaten in der Taktfolge des Scanvorgangs durchzuführen und als Bestandteil einer kompletten Verarbeitungskette vor dem Archivieren einzufügen. Dies ist aufgrund der Komplexität der Pixonenmethode derzeit nur für ausgewählte Teilregionen möglich. Neben der Anwendung für astronomische Bildinhalte gehen die weiteren Überlegungen derzeit dahin, das pixonenbasierte Verfahren auch im Bereich der medizinischen Bildrestauration einzusetzen.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] R.C. Puetter: *Information, Language, and Pixon-Based Bayesian Image Reconstruction*, Proc. of S.P.I.E. Vol.2827 Digital Image Recovery and Synthesis III, Denver, CO August 1996, S. 12-31
- [2] R.C. Puetter: *Image Reconstruction of Complexly Encoded Data - Lecture 5*, Proceeding of the 1995 IAC Winterschool, 3-12 December 1995, Tenerife, Spain, in press., URL: http://casswww.ucsd.edu/personal/puetter/rcp_pubs.html

Autorenangabe:

Dipl.-Ing. R. Nestler
TU Ilmenau, FG Grafische Datenverarbeitung
Postfach 100565
98694 Ilmenau
Tel.: +49 (3677) 2010305
Fax: +49 (3677) 2010302
E-Mail: Rico.Nestler@tu-ilmenau.de

PD Dr.-Ing. K.-H. Franke
TU Ilmenau, FG Grafische Datenverarbeitung
Postfach 100565
98694 Ilmenau
Tel.: +49 (3677) 2010300
Fax: +49 (3677) 2010302
E-Mail: Karl-Heinz.Franke@praktinf.tu-ilmenau.de

⁴Als Vergleich dient die Maximum-Likelihood-(ML)-Schätzung der gesuchten Lösung.

⁵auf einem wenig strukturierten Hintergrund

⁶Bei der Aperturfotometrie wird das Helligkeitsäquivalent durch Summation der Pixelwerte unter einer Messapertur bestimmt.

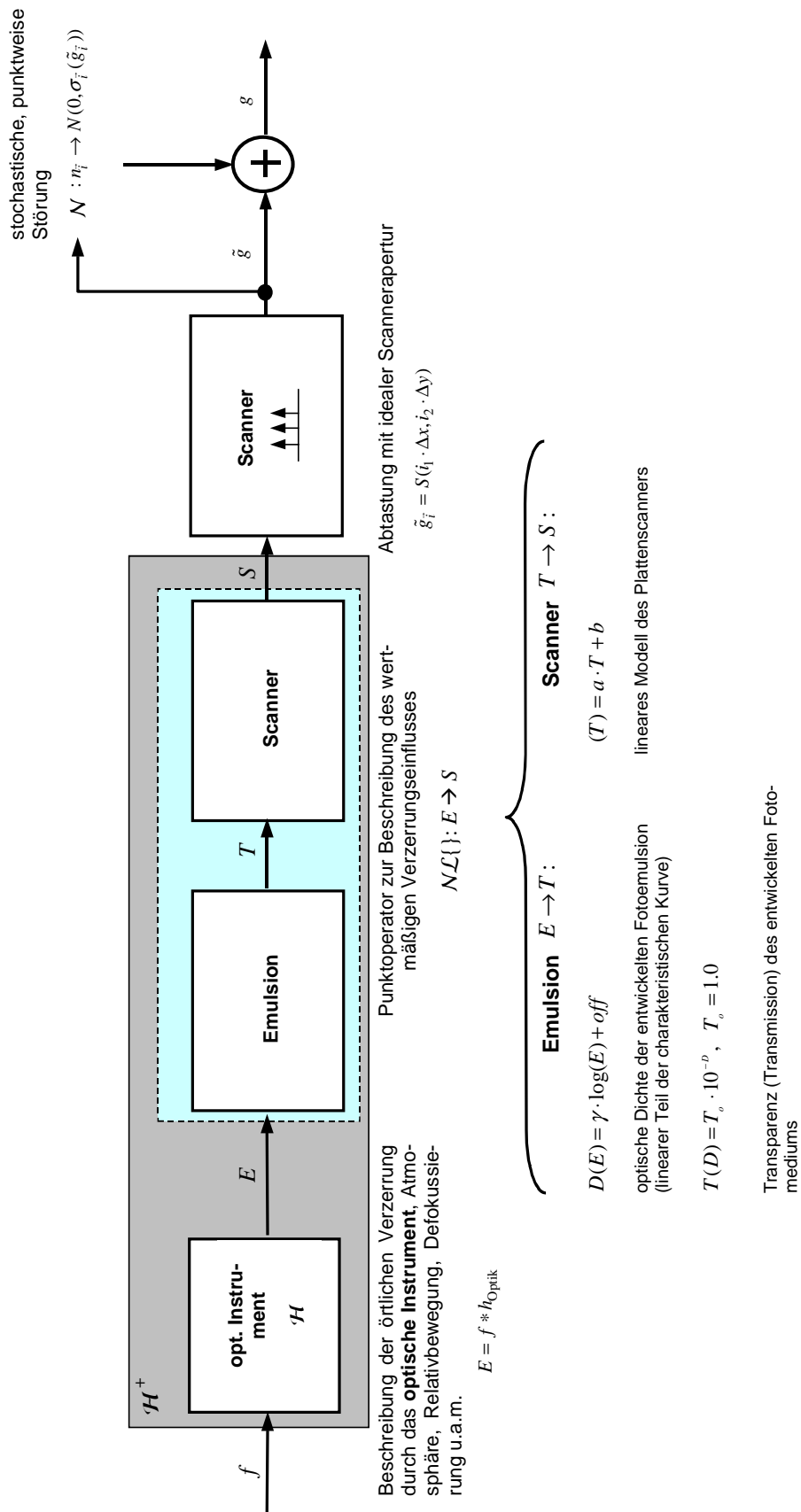


Abbildung 1: Bildformationsmodell für die Restauration von digitalisierten Fotoplatten

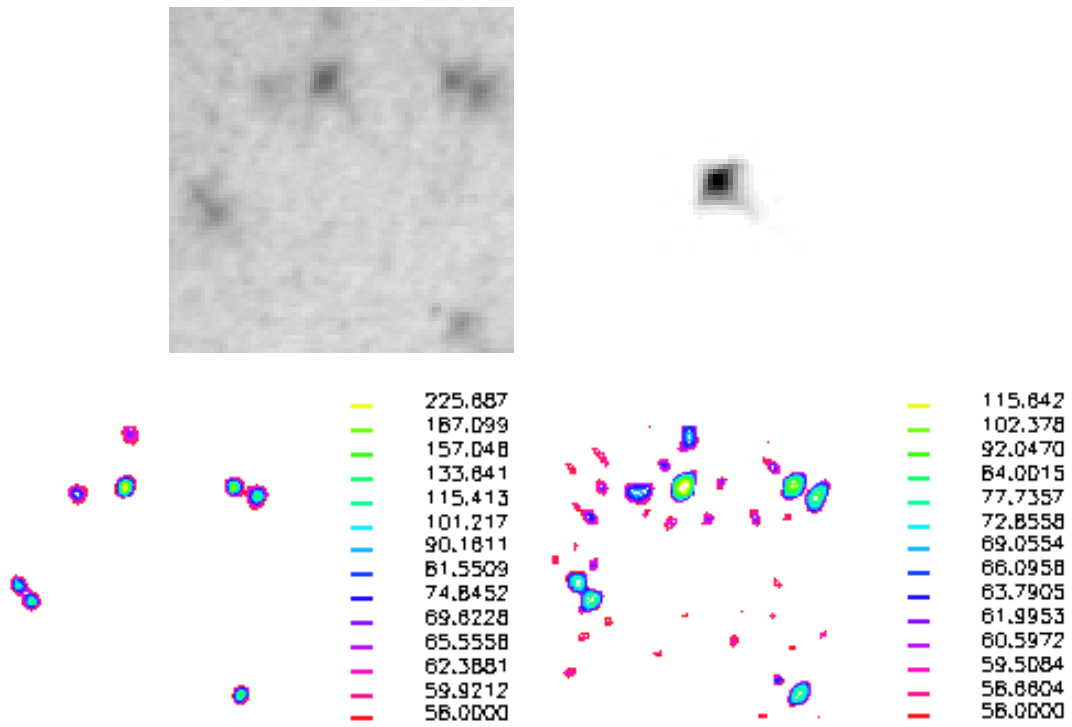


Abbildung 2: Testregion mit unsymmetrischen PSF-Einfluss (oben links), repräsentatives PSF-Pixelmuster (oben rechts), pixonenbasiertes Restaurationsergebnis (unten links) und unregulisierte ML-Lösung (unten rechts) in Konturdarstellung

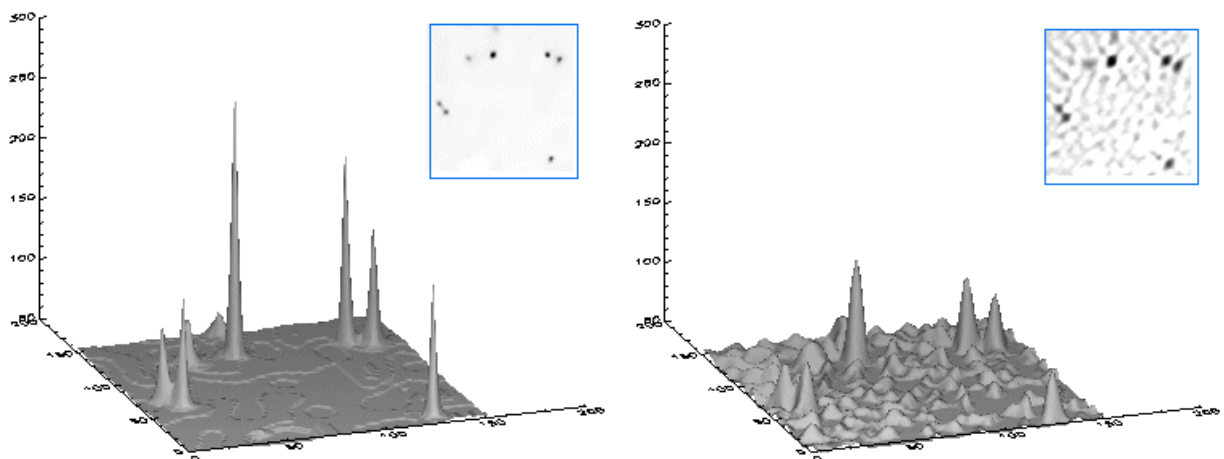


Abbildung 3: Pixonenbasiertes Restaurationsergebnis (links) und unregulisierte ML-Lösung (rechts) in 2.5d-Darstellung