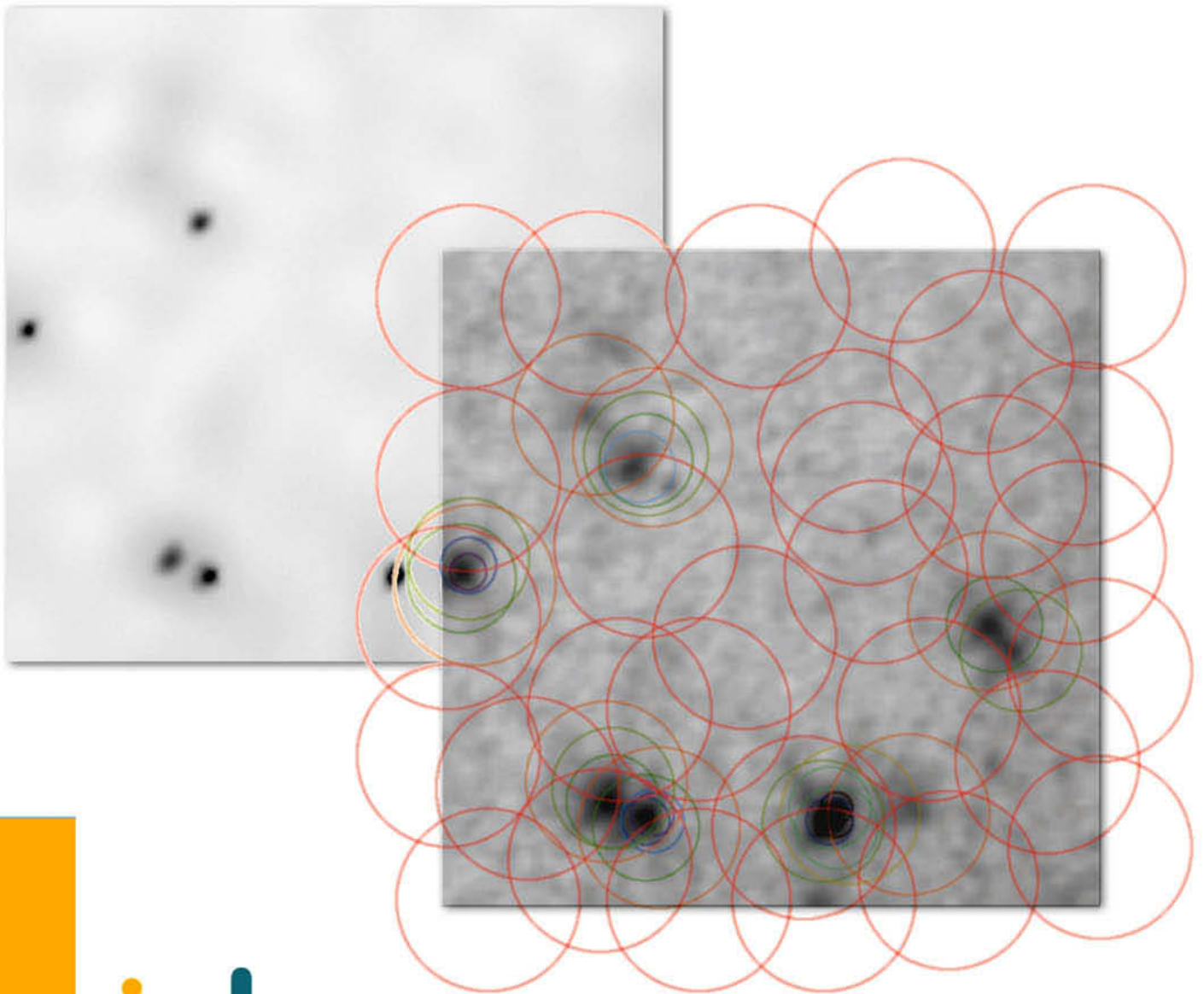


Rico Nestler

Freiheitsgradregularisierte Lösungsbeschreibungen in der wissenschaftlichen Bildanalyse

am Beispiel der Restauration von
astronomischen Himmelsüberwachungsaufnahmen



isle

Freiheitsgradregularisierte Lösungsbeschreibungen
in der wissenschaftlichen Bildanalyse
am Beispiel der Restauration astronomischer
Himmelsüberwachungsaufnahmen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der Fakultät für Informatik und Automatisierung
der Technischen Universität Ilmenau

von **Dipl.-Ing. Rico Nestler**

geboren am 13. Juni 1972 in Bleicherode

vorgelegt am 29. September 2011

Gutachter: Privatdozent Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Franke (TU Ilmenau)

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Michael Groß (TU Ilmenau)

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Ralf Reulke (Humboldt-Universität zu Berlin)

Wissenschaftliche Aussprache am 13. November 2012

Danksagung

Für meine Doktorarbeit schulde ich sehr vielen Menschen Dank. Aber bevor ich mich in Aufzählungen verliere und ich damit dem einen oder anderen zuviel oder zuwenig Bedeutung zukommen lasse, danke ich hiermit **allen**, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Dr. Karl-Heinz Franke, den Gutachtern, den Verantwortlichen der Graduiertenschule „Bildverarbeitung und Bildinterpretation“ der Technischen Universität Ilmenau und dem Team des Zentrums für Bild- und Signalverarbeitung e.V. . Danke sage ich auch meiner Familie und meinem ganz privaten Umfeld, das während der Erstellung dieser Arbeit viel Rücksicht und Verständnis dafür aufgebracht hat.

Zusammenfassung

Bildhafte Messdaten sind infolge des limitierten Übertragungsverhaltens realer Abbildungssysteme und der allgegenwärtigen Präsenz von Messunsicherheiten bei der Datenentstehung ein unvollkommenes und gestörtes Abbild der physikalischen Realität. Der Rückschluss auf die ursächliche Szene ist Gegenstand der *Bilddatenrestauration*. Von zentraler Bedeutung für den weiteren Prozess der wissenschaftlichen Bilddatenanalyse ist die Gewährleistung von evidenten und artefaktfreien Lösungen. Dies erfolgt über das Einbringen von zusätzlichem Wissen zum Problem und zu bevorzugten Lösungseigenschaften. Dieser Vorgang wird als *Regularisierung* bezeichnet.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht das Prinzip der Regularisierung durch *adaptiv freiheitsgradbeschränkte Lösungsbeschreibungen*. Diesem Ansatz liegt die Vorstellung zugrunde, dass die regionale Anpassung der Freiheitsgrade an die zugrunde liegenden Messdaten eine Möglichkeit darstellt, die Messdateninformation bei einem gleichzeitig stabilen Lösungsaufbau optimal auszuschöpfen. Der damit verbundene *pixonenbasierte Regularisierungsansatz* ist sehr leistungsfähig und universell einsetzbar.

Der Gegenstand der Arbeit ist eine umfassende inhaltliche Auseinandersetzung mit diesem Regularisationsprinzip zur Lösung eines konkreten Restaurationsproblems. Dabei werden die Konzepte der diskreten und der kontinuierlichen *vollparametrischen Pixonenbasis* neu eingeführt und diskutiert. Die Elemente des zugehörigen *parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells* zur Lösungsbeschreibung werden im Gegensatz zu bereits bekannten Umsetzungen dieses Prinzips simultan durch parametrische Schätzverfahren ermittelt. Zur Erhöhung der Beschreibungsflexibilität des propagierten parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells werden Modellvarianten, wie der Lösungsaufbau mit parametrischer Signalentkopplung und der Lösungsaufbau mit multivariaten Aufbauelementen, vorgestellt und im Kontext des vorgestellten Lösungsverfahrens evaluiert.

Das Anwendungsszenario für die erarbeiteten methodischen Ergebnisse ist die Restauration von digitalisierten Fotoplatten der Himmelsüberwachung des Sonneberger Plattenarchivs. Die Datengrundlage ist gekennzeichnet durch vielfältige nichtlineare Signalwechselwirkungen des mehrstufigen Abbildungsprozesses. Ein wichtiger Bestandteil der Arbeit ist daher die ausführliche Analyse des Datenmaterials und der Entwurf einer adäquaten Datenmodellierung für die optische, fotochemische und fotoelektrische Signalwandlung und die komplexen Messunsicherheiten. Anhand ausgewählter Datenbeispiele werden die Effekte der Restauration für die weiterführende astronomische Datenanalyse beurteilt.

Obwohl die Ausführungen in dieser Arbeit immer im engen Bezug zu diesem Anwendungsfall stehen, sind die dargestellten Inhalte und Resultate ein guter Ausgangspunkt zur Lösung von inversen Problemstellungen in vielen weiteren Anwendungsfällen der wissenschaftlichen Bildanalyse.

Abstract

Image-based measurement data are an incomplete and distorted representation of physical reality because of the limited transfer behaviour of actual imaging systems and ever-present measurement uncertainties when data are created. The goal of image restoration is the recreation of an original scene through the computational reversal of the image formation process. A problem evident and artefact-free solution is of central importance for the usability in the further scientific analysis of image data. The proper selection is done by bringing in additional knowledge of the problem and the properties of favoured solutions. This process is called *regularisation*.

The principle of regularisation using *adaptive solution descriptions with limited degrees of freedom* is the central focus of this work. This approach is based on the perception that regional adaptation of the degrees of freedom to the basis of the measurement data is a possibility to optimally utilise information in the measurement data while simultaneously stabilising the problem. Through this, the *pixion-based regularisation approach* is both capable and universal, especially for discovering hidden scene information in strongly distorted image-based measurement data. In the case of image data, this principle becomes useful for going beyond the pixel to the *pixion*, which is a generalised solution-building element with a variable form.

The object of the present work is the comprehensive and contextual examination with the aforementioned regularisation principle in the context of the general restoration problem. Here, the concepts of discrete and continuous *parametric pixion basis* are introduced and discussed. The elements of the corresponding *parametric fuzzy pixion model* for describing solutions are simultaneously determined using parametric estimation approaches in contrast to the implementations of this principle already known. The design and configuration of the related restoration process results from a special probabilistic description of the restoration problem considering a variable solution model. In order to increase the descriptive flexibility of the parametric fuzzy pixion model, new elements such as a solution structure with parametric signal decoupling or a structure with multi-variable structural elements are introduced and evaluated in the context of the propagated solution method.

The application scenario for the developed approach is the restoration of digitalised photographic plates from astronomical observations contained in the Sonneberg plate archive. The measurement data is characteristically influenced by a multitude of signal interdependencies within a multistage imaging process. Therefore an important aspect of this work is the comprehensive analysis of the available data and the design of an adequate data modelling for the optical, photochemical and photoelectric signal conversion and the corresponding complex measurement uncertainties. The effects on astronomical data analysis of plate contents are evaluated on the basis of the restoration results of selected example data sets.

Even though the demonstrations contained in this work are closely related to this use case, the information and results discussed here represent an excellent starting point for solving inverse problems in many other application areas of the scientific analysis of image data.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangspunkt der Arbeit	3
1.2	Gliederung der Arbeit	7
2	Grundlagen	11
2.1	Digitale Bilddatenrestauration im Kontext inverser Probleme	11
2.2	Mathematische Beschreibung des Bildrestaurationsproblems	15
2.3	Analyse diskreter, schlecht gestellter Entfaltungsprobleme	20
2.3.1	Problemcharakterisierung und -analyse durch Singulärwertzerlegung	22
2.3.2	Alternative orthogonale Zerlegungen - die Spektralwertzerlegung	30
2.3.3	Ill-posed-Charakter mehrstufiger Datenentstehungsmodelle	34
2.3.4	Zusammenfassung	38
3	Charakterisierung von Datenentstehungsprozessen	41
3.1	Deterministische Modellierung von Datenentstehungsprozessen	44
3.1.1	Beschreibung der Unschärfewirkung im Datenentstehungsprozess	44
3.1.2	Die Rolle nichtlinearer, deterministischer Einflüsse im Datenentstehungsprozess	58
3.1.3	Schlussfolgerungen für das Anwendungsszenario „Himmelsüberwachung“	60
3.2	Statistische Modellierung von Datenentstehungsprozessen	64
3.2.1	Allgemeine statistische Beschreibung stochastischer Messunsicherheiten	66
3.2.2	Der Gauß-Prozess	67
3.2.3	Der Poisson-Prozess	68
3.2.4	Statistische Eigenschaften von Zufallsfeldern	70
3.2.5	Die Rolle statistischer Modelle zur Bewertung von Lösungskonfigurationen	73
3.2.6	Messunsicherheiten im Kontext inverser Probleme	75
3.2.7	Schlussfolgerungen für das Anwendungsszenario „Himmelsüberwachung“	78

4	Problemregularisierung & Lösungsaufbaumodelle	85
4.1	Regularisierungsansatz nach Tikhonov-Miller	87
4.2	Systematischer Überblick zu Lösungsaufbaumodellen	89
4.2.1	Deterministische Lösungsaufbaumodelle für astronomische Szeneninhalte	95
4.2.2	Statistische Lösungsaufbaumodelle für astronomische Szeneninhalte	99
4.3	Lösungsaufbaumodelle für das Anwendungsszenario „Himmelsüberwachung“	108
5	Überblick zu Bildrestaurationsverfahren	113
5.1	Direkte Ansätze zur regularisierten Problemlösung	114
5.2	Indirekte Ansätze zur regularisierten Problemlösung	119
5.3	Probabilistische Problembeschreibungen - Bayesscher Ansatz	126
6	Regularisierung durch freiheitsgradbeschränkte Lösungsaufbaumodelle	137
6.1	Freiheitsgradbeschränkung als Regularisierungsprinzip	137
6.2	Das Pixonen-Prinzip im Kontext Bayesscher Schätzverfahren - Occam's Razor	144
6.3	Der generalisierte Maximum-Entropie-Prior - das uniforme Pixonen-Modell	148
6.4	Das Prinzip des Lösungsaufbaus mit einem Fuzzy-Pixonen-Modell	150
6.5	Die Pixonenmethode	153
6.6	Freiheitsgradbeschränkte, vollständig parametrische Lösungsbeschreibungen	161
6.6.1	Bayessche Ableitung der Signal-Modell-Paarungen des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells	162
6.6.2	Optimierungsfunktionale zur Bestimmung problemoptimaler, parametrischer Lösungskonfigurationen	169
6.6.3	Das mehrstufige, zyklische Lösungsverfahren	172
6.6.4	Erweitertes Fuzzy-Pixonen-Modell mit parametrischer Signalentkopplung	190
6.6.5	Freiheitsgrad-regularisierte Entfaltung mit multivariaten pixonenbasierten Lösungsaufbaumodellen	197
6.6.6	Realisierung einer kontinuierlichen Pixonenbasis aus approximierten Aufbauelementen	210
6.6.7	Analyse der Verfahrenskomplexität	222
7	Restauration digitalisierter Fotoplatten des Sonneberger Archivs	233
7.1	Einleitung	233
7.2	Charakterisierung der Datengrundlage	237
7.3	Das mehrstufige Datenentstehungsmodell der Sonneberger Plattendaten	249
7.3.1	Deterministische Beschreibung der Datenentstehung	253

7.3.2	Statistische Beschreibung der Datenentstehung	265
7.3.3	Zusammenfassung	273
7.4	Ergebnisse	276
7.4.1	Restauration im Plattenrandbereich mit stark unsymmetrischem Punkt- bild	277
7.4.2	Zentraler Plattenausschnitt mit variierender Sterndichte	283
7.4.3	Fotometrische Bewertung des Restaurationsschrittes	286
7.4.4	Freiheitsgradregularisiertes Denoising	290
7.5	Anmerkungen zu Verfahrenslaufzeiten	294
8	Zusammenfassung und Ausblick	297
A	Gradienten der Optimierungsfunktionale	303
A.1	Δ -Gradienten des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells	306
A.2	O^S -Gradienten des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells	310
B	Aufbauelemente parametrischer Fuzzy-Pixonen-Basen	313
B.1	Elemente der gaußförmigen Fuzzy-Pixonen-Basis	314
B.1.1	Univariate, rotationssymmetrische Aufbauelemente	314
B.1.2	Multivariate, anisotrope Aufbauelemente	318
B.2	Elemente der parabolischen Fuzzy-Pixonen-Basis	321
B.2.1	Univariate, rotationssymmetrische Aufbauelemente	321

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bildrestauration im Kontext allgemeiner inverser Fragestellungen	12
2.2	Bilddatenentstehung und Bildrestauration am Beispiel astronomischer Himmelsüberwachungsaufnahmen	14
2.3	Zirkulante Systemmatrix eines 2d-Gauß-Faltungskerns	22
2.4	Singulärwerte der zirkulanten Systemmatrix eines linearen Gleichungssystems	26
2.5	Orthonormale Singulärvektoren der zirkulanten Systemmatrix des linearen Gleichungssystems als Basisfunktionen im Ausgangsraum	28
3.1	Signalbeziehungen und Informationsfluss zwischen Bilddatenentstehung und Bilddatenrestauration, Informationsquellen zur Charakterisierung des Datenentstehungsmodells	44
3.2	Überblick zu Blind-Deconvolution-Verfahren	50
3.3	Kontrastübertragungsfunktionen im Fall stochastischer und deterministischer PSF-Beschreibungsfehler	57
3.4	Beschreibung der Bildentstehung in einer Fotoplatte durch ein nichtlineares dynamisches System	59
3.5	Rauschen im Kontext eines Entfaltungsproblems	77
3.6	Qualitative und Quantitative Charakterisierung von Messunsicherheiten des kosmischen Signalhintergrundes	83
4.1	Systematischer Überblick zu Lösungsaufbaumodellen und Restaurationsverfahren	90
4.2	Prinzip hybrider parametrischer/nicht parametrischer Lösungsaufbaumodelle	99
5.1	Original Testbild „Lena“, synthetisch erzeugte Messdaten, Restaurationsergebnis der unregularisierten Least-Squares-Inversen	118
5.2	Restaurationsergebnisse der klassischen Wiener-Inversen, der Constrained Least-Squares-Inversen und der Pseudo-Inversen	118

5.3	Multivariates Gütefunktional im Lösungsraum für ein Problem mit komplexer Beschreibung	122
5.4	Restaurationsergebnisse ausgewählter iterativer Lösungsverfahren mit nicht adaptiver bzw. stationärer Regularisierung	136
6.1	Likelihood-Randwahrscheinlichkeitsdichten zweier Lösungskonfigurationen mit unterschiedlichen Modellhypothesen	146
6.2	Prinzip des Fuzzy-Pixon-Lösungsaufbaus	151
6.3	Gaußförmige und parabolische 2d-Aufbauelemente des Fuzzy-Pixon-Modells	154
6.4	Originäres Verfahren zur Bestimmung der Komponenten des Fuzzy-Pixon-Modells laut <i>Puetter</i> und <i>Piña</i>	157
6.5	Beispiel einer Lösungsbeschreibung mit einer elliptischen Fuzzy-Pixon-Basis .	160
6.6	Zyklisches Schätzschema zur Bestimmung des problemoptimalen Signal-Modell-Paares für eine parametrische Pixonenbasis	173
6.7	Residuenvergleich von Lösungen mit einem klassischen Regularisierungsansatz und dem propagierten freiheitsgradregularisierten Ansatz	190
6.8	Effekt des parametrisch signalentkoppelten Lösungsaufbaus	194
6.9	Lösungsschätzung des erweiterten Fuzzy-Pixonen-Modells mit parametrischer Signalentkopplung	197
6.10	Messdatensituation bei der Bestimmung des Oberflächenpotentials an der Kalibrierstruktur BAM-L200	199
6.11	Aufbauelement der anisotropen pFPB	201
6.12	Schema zum Finden der optimalen Signal-Modell-Paarung mit multivariater parametrischer Pixonenbasis	204
6.13	Differenzielle Aufbauelemente der anisotropen pFPB	206
6.14	Testszenario für das multivariate parametrische Fuzzy-Pixonen-Modells . . .	208
6.15	Restaurationsergebnisse	208
6.16	Gütefunktional $\Phi(\hat{\Delta})$ einer diskreten Pixonenbasis bei kontinuierlicher Variation zweier Parameter der Lösungskonfiguration $\hat{\Delta}$	211
6.17	Analyse von Aufbauelementen der approximiert kontinuierlichen Pixonenbasis	215
6.18	Gütefunktional $\Phi(\hat{\Delta}^{\text{Approx}})$ einer approximiert kontinuierlichen Pixonenbasis für zwei Parameter der Lösungskonfiguration $\hat{\Delta}$	218
6.19	Bestimmung optimaler Lösungskonfigurationen bei kontinuierlicher und diskreter Pixonenbasis (Beispiel 1)	219
6.20	Bestimmung optimaler Lösungskonfigurationen bei kontinuierlicher und diskreter Pixonenbasis (Beispiel 2)	220

6.21	Intervallmittenbezogene und fehleroptimierte Festlegung der Approximationsintervalle für die Realisierung der kontinuierlichen Pixonenbasis	221
6.22	Pixonenbasierte Lösungsbeschreibungen eines Entfaltungsproblems mit einer approximiert kontinuierlichen und einer diskreten Pixonenbasis	222
6.23	Top-Down-Abschätzung der algorithmischen Verfahrenskomplexität des zyklisch mehrschrittigen Lösungsverfahrens.	225
6.24	Prinzip der Datenpartitionierung am Beispiel eines gescannten Plattenausschnitts	229
7.1	Simultane SP-Plattenaufnahmen verschiedener spektraler Empfindlichkeit am Beispiel einer Himmelsregion mit M31-Galaxie	239
7.2	Aberrationseinfluss in unterschiedlichen Plattenregionen	240
7.3	Unsymmetrische Deformation von Sternabbildern in Abhängigkeit vom radialen Abstand zum Plattenzentrum.	241
7.4	Komplexes Scandatenshading durch mehrstufige Abbildung	243
7.5	Analyse der Vignettierung im Plattenzentrum einer SP-Platte	245
7.6	Szeneneigene Plattenartefakte	246
7.7	Datenartefakte durch Gebrauch	247
7.8	Datenartefakte durch Erosion	248
7.9	Datenartefakte durch den Scanvorgang	248
7.10	Mehrstufige Datenentstehung der Sonneberger Fotoplatten	250
7.11	Algorithmus zur Bestimmung des repräsentativen Punktbildes in einer Plattenregion	256
7.12	Plattenrandbereich mit starkem Astigmatismuseinfluss und repräsentativem Punktbild	257
7.13	D-logE-Kurve einer fotografischen (Positiv)Emulsion zur Charakterisierung des makroskopischen densitometrischen Verhaltens	258
7.14	Zusammenhang zwischen Belichtung und resultierendem Plattentransmissionsgrad	260
7.15	Mikroskopisches Modell einer fotografischen Schicht aus unabhängigen, gleichartigen Quantenempfängern	266
7.16	Verzerrung der Statistik des Photonenrauschens durch einen Detektor mit gesättigtem Übertragungsverhalten	267
7.17	Modellierter Zusammenhang zwischen Varianz und Erwartungswert des Scannersignals	272
7.18	Reale Messunsicherheit in einer Testregion des kosmischen Signalhintergrundes.	273

7.19	Datenentstehungsmodell digitalisierter Daten der Himmelsüberwachung für eine räumlich begrenzte Plattenregion	274
7.20	Prädiktormodell digitalisierter Daten der Himmelsüberwachung für eine räumlich begrenzte Plattenregion	275
7.21	M31-Galaxie in Plattenrandregion mit stark unsymmetrischem Punktbild	278
7.22	M31-Restaurationsergebnis: Lösungskomponenten	279
7.23	M31-Restaurationsergebnis: Isoquantendarstellung	280
7.24	M31-Restaurationsergebnis: 2.5D-Darstellung	281
7.25	M31-Restaurationsergebnis: Residuum und Pixonenoverlay	282
7.26	Region 3 des M31-Feldes mit Sterngruppe auf Andromeda, pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnisse nicht freiheitsgradbeschränkter Vergleichsverfahren	283
7.27	Region 5 des M31-Feldes mit sternähnlichem Datenartefakt und zwei eng benachbarten Sternpaaren, pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnisse nicht freiheitsgradbeschränkter Vergleichsverfahren	283
7.28	κ Cas-Plattenausschnitt mit komatisch deformierter Unschärfe und stark variierender Objektdichte und pixonenbasiertes Restaurationsergebnis	284
7.29	Region 1 des κ Cas-Feldes mit 3 offenen Sternhaufen NGC146, NGC133 und King14 in einem Abschnitt hoher Sterndichte, repräsentatives Punktbild, pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des iterativen Least-Squares-Verfahrens	286
7.30	Pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des iterativen Least-Squares-Verfahrens der Region 1 des κ Cas-Feldes in Isoquantendarstellung	286
7.31	Region 2 des κ Cas-Feldes mit offenem Sternhaufen in einem Abschnitt geringer Sterndichte, repräsentatives Punktbild, pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des iterativen Least-Squares-Verfahrens	287
7.32	Pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des iterativen Least-Squares-Verfahrens der Region 2 des κ Cas-Feldes in Isoquantendarstellung	287
7.33	Synthetische Datensituation, repräsentatives Punktbild, pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des Vergleichsverfahrens	289
7.34	Pixonenbasiertes Restaurationsergebnis und Ergebnis des Vergleichsverfahrens in 2.5D-Darstellung	289
7.35	Fotometrische Signalverhältnisse in restaurierten Bildern mit unterschiedlich parametrisierten Emulsionsmodellen	291
7.36	Pixonenbasiertes Denoising: Beispielregion aus M31-Feld, Restaurationsergebnis im nichtlinear verzerrten Wertebereich, Residuum und Restaurationsergebnis im linearen Ausgangsraum	293

7.37	Pixonenbasiertes Denoising: Beispielregion aus M31-Feld, Restaurationsergebnis im nichtlinear verzerrten Wertebereich und Ergebnis im linearen Ausgangsraum als 2.5D-Darstellung	294
7.38	Pixonenbasiertes Denoising: Beispielregion aus M31-Feld mit repräsentativem Punktbild, repräsentatives Punktbild aus Scandaten und repräsentatives Punktbild aus Denoisingsergebnis	295
B.1	Aufbauelement der pFPB mit isotroper, gaußförmiger Grundform	315
B.2	Aufbauelement der pFPB mit isotroper, gaußförmiger Grundform im Orts- und Ortsfrequenzbereich	317
B.3	Differentielles Aufbauelement der pFPB mit isotroper, gaußförmiger Grundform	317
B.4	Diskrete Ableitung 1.Ordnung eines Aufbauelementes der pFPB mit isotroper, gaußförmiger Grundform	318
B.5	Aufbauelement der pFPB mit anisotroper, gaußförmiger Grundform	320
B.6	Aufbauelement der pFPB mit isotroper, parabolischer Grundform	322
B.7	Differentielles Aufbauelement der pFPB mit isotroper, parabolischer Grundform	323
B.8	Maskenfunktion für parametrische Aufbauelemente mit isotroper, parabolischer Grundform	323

Tabellenverzeichnis

2	Gegenüberstellung von Integralgleichungs- und Matrix-Vektor-Notation . . .	xxii
3.1	Physikalische Ursachen für Unschärfen im Bildaufnahmeprozess bei der terrestrischen optischen Himmelsbeobachtung	61
3.2	Stochastische Messunsicherheiten in der optischen Astronomie und zugehörige statistische Beschreibungsmodelle	79
4.1	Überblick zu nicht parametrischen deterministischen Lösungsaufbaumodellen	96
5.1	Realisierungsvarianten linearer spektraler Restaurationsfilter	117
6.1	Zyklusbeschreibung des mehrstufigen Lösungsansatzes und Ableitung der Optimierungsfunktionale der Teilschritte	174
6.2	Worst-Case-Realisierungsaufwand der funktionalen Ausdrücke eines Lösungsansatzes mit parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modellen	224
6.3	Ablaufschema des Gradientenabstiegsverfahrens nach MacKay	226
6.4	Prozessierung von laufzeitkritischen FFT-Codeabschnitten mit GPU's	228
7.1	Aufnahmeparameter der untersuchten Fotoplatten der Himmelsüberwachung des Sonneberger Archivs	238
7.2	Ergebnisse der aperturfotometrischen Auswertung in restaurierten Bildern mit unterschiedlich parametrisierten Emulsionsmodellen.	290

Kapitel 1

Einleitung

Bildhafte Messdaten sind infolge des limitierten Übertragungsverhaltens realer Abbildungssysteme und der allgegenwärtigen Präsenz von Messunsicherheiten bei der Datenentstehung ein unvollkommenes und gestörtes Abbild der physikalischen Realität. Der Rückschluss auf die zugrunde liegenden, ursprünglichen Szeneneigenschaften durch rechnerische Umkehr des Datenentstehungsvorgangs ist Gegenstand der *Bilddatenrestauration*. Aufgrund der schlechten Konditionierung dieses Problems führt diese prinzipbedingt zu einer Lösungsmenge, die neben der korrekten Lösung eine große Zahl zumeist physikalisch unplausibler Lösungen enthält. Die Aussagekraft der Lösungsauswahl für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte wird durch Restaurationsartefakte stark eingeschränkt. Diese sind eine Folge des Missverhältnisses zwischen der zur vollständigen Lösungsbeschreibung erforderlichen und der durch die Messdaten bereitgestellten aussagekräftigen Szeneninformation. Von zentraler Bedeutung ist daher die Reduzierung der Lösungsmenge und die Stabilisierung der Lösungseigenschaften durch *Regularisierung*. Dabei wird zusätzliches Wissen zum Problem und zu den erwarteten Eigenschaften von Lösungen des Problems über ein *Lösungsaufbaumodell* eingebracht und so das bestehende Informationsdefizit ausgeglichen.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht das Prinzip der *Regularisierung durch adaptiv freiheitsgradbeschränkte Lösungsbeschreibungen*. Dem Ansatz liegt die Vorstellung zugrunde, dass die regionale Anpassung der Freiheitsgrade einer Lösungsbeschreibung an die Messdatengrundlage eine zwangsläufig optimale Form der Problemstabilisierung bei gleichzeitiger Ausschöpfung der Messdateninformation darstellt. Das Ergebnis ist eine Lösung mit dem *einfachsten* Beschreibungsmodell zur Erklärung der Datensituation des konkreten Problems. Eine Möglichkeit dieses Prinzip im Bereich bildhafter Daten nutzbar zu machen, ist durch den Übergang vom individuellen Einzelpixel zum *Pixon*, einem generalisierten Lösungsaufbauelement mit variabler Ausdehnung und Gestalt, gegeben.

Der sehr universelle und besonders leistungsfähige pixonenbasierte Ansatz besitzt das Potential, auch unter sehr schwierigen Signalverhältnissen datenkonsistente **und** artefaktfreie Lösungen zu realisieren. Er ist damit insbesondere zum Erschließen von verborgenen Szeneninformationen in stark gestörten Messdaten von herausragender Bedeutung. Derartige Datensituationen treten in der wissenschaftlichen Bilddatenanalyse sehr häufig auf.

Der Gegenstand der Arbeit ist die umfassende inhaltliche Auseinandersetzung mit diesem Regularisationsprinzip im Kontext des allgemeinen Restaurationsproblems. Dabei werden die Konzepte der diskreten und der kontinuierlichen *parametrischen Pixonenbasis* neu eingeführt und diskutiert. Die Elemente des zugehörigen *parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells* zur Lösungsbeschreibung werden im Gegensatz zu bereits bekannten Umsetzungen dieses Prinzips simultan durch parametrische Schätzverfahren ermittelt. Die dargestellte Vorgehensweise zur Ableitung problem- und modelloptimaler Lösungskonfigurationen folgt zwingend logisch aus einer probabilistischen Beschreibung des Restaurationsproblems mit einem variablen Lösungsmodell. Zur weiteren Erhöhung der Beschreibungsflexibilität des pixonenbasierten Lösungsaufbaus werden Varianten, wie der Lösungsaufbau mit parametrischer Signalkopplung oder der Lösungsaufbau mit multivariaten Aufbauelementen, vorgestellt und im Kontext des propagierten zyklisch mehrstufigen Lösungsverfahrens evaluiert. Diese Erweiterungen erfolgen vor dem Hintergrund, diese Form der regularisierten Lösungsbeschreibung auch in anderen Anwendungsfällen, als dem hier beschriebenen, nutzbar zu machen.

Der Verarbeitungsprozess digitaler Bilddaten umfasst nach dem klassischen Bottom-Up-Paradigma die *Vorverarbeitung* zur Beseitigung irrelevanter und zur Hervorhebung relevanter Dateninhalte, die semantische *Segmentierung* und *Klassifikation* in verschiedenen Abstraktionsebenen sowie letztlich die Ableitung problembezogener, symbolischer Rückschlüsse auf dieser Datengrundlage. Die in Form digitaler, bildhafter Messdaten repräsentierte zunächst stark redundante, ikonische Ausgangsbeschreibung erfährt dabei einen Wandlungsprozess hin zu einer reduzierten, symbolischen Charakterisierung des problemrelevanten Szeneninhaltes. Mit der Abnahme von Datenmenge und Redundanz der Szenenbeschreibung nimmt die Notwendigkeit zu, immer engere Bezüge zur konkreten Problemstellung bzw. zum Anliegen der Prozessierung über a priori Wissen herzustellen. Eine gewisse Sonderstellung nimmt hierbei die *digitale Bilddatenrestauration* ein.

Der Restaurationsschritt bereitet höhere bildanalytische Verarbeitungsprozesse vor und ist aus Sicht seiner Zielstellungen formal der Vorverarbeitung zuzuordnen. Im Gegensatz zu den übrigen Methoden dieser Gruppe ist die Datenrestauration ein spezifisch an einem Problem und der zugehörigen Datensituation ausgerichteter, in sich mehrstufiger Prozess. Dieser umfasst die Charakterisierung und Modellierung der Datenentstehung und die meist datenbezogene Parametrierung des Datenentstehungsmodells. Darüber hinaus wird die Art und

Weise der Problemregularisierung über das Lösungsaufbaumodell ganz wesentlich durch den Applikationsfall und den Zweck der weiteren Datenprozessierung bestimmt.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Versuch unternommen, die untrennbaren Bestandteile des Datenrestaurationsprozesses - die Datenentstehungsmodellierung, die Regularisierung und das algorithmische Lösungskonzept - in sehr umfassender Form darzustellen. Einen besonders großen Stellenwert nimmt dabei die Problemregularisierung ein.

Das Anwendungsszenario für den zu entwickelnden Restaurationsansatz ist die Prozessierung von digitalisierten Fotoplatten der Himmelsüberwachung des Sonneberger Plattenarchivs. Die Datengrundlage ist infolge der mehrstufigen Abbildung durch die vielfältigen Wechselwirkungen des ursprünglichen Szenesignals mit dem System Atmosphäre-Optik-Film-Scanner charakteristisch beeinflusst. Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit ist daher die ausführliche Analyse des vorliegenden Datenmaterials und der Entwurf einer adäquaten Datenmodellierung für die optischen, fotochemischen und fotoelektrischen Wandlungsprozesse und die wirksamen komplexen Messunsicherheiten. Daraus folgen unmittelbar Rückschlüsse für ein adäquates methodisches Vorgehen unter diesen Verhältnissen.

Nachteilig für die astronomische Bildanalyse des digitalisierten Plattenmaterials sind der allgegenwärtige regionenspezifische Einfluss der bandbegrenzenden, nichtlinearen Abbildungsprozesse im Szenenabbild und die prinzipbedingt schwierigen Signalverhältnisse insbesondere der Abbilder astronomisch interessanter Objekte. Die Zielstellung des Restaurations schrittes ist daher eine Datenrepräsentation, die einem idealisierten linearen Abbildungssystem entspricht. Aus Sicht der nachfolgenden Analyseschritte ist dabei das Herstellen einer artefaktfreien, das heißt ausschließlich durch relevante Datenbestandteile bestimmten Lösung mit einem stationären, symmetrischem Punktbild der zu erreichende Idealzustand.

Anhand von ausgewählten Datenbeispielen soll das Erreichen dieser Zielstellung und der daraus erzielbare Effekte für die wissenschaftliche (astronomische) Datenanalyse von Platteninhalten beurteilt werden. Entscheidende Beiträge zur qualifizierten Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit resultieren aus der Kooperation mit dem Zweckverband Sternwarte Sonneberg e.V. .

1.1 Ausgangspunkt der Arbeit

Digitale Bilddatenrestaurations bezeichnet den Prozess der rechnerischen Umkehrung einer modellhaften Abbildung, die den Entstehungsprozess bildhafter, digitaler Messdaten beschreibt. Das Ziel ist es, auf der Grundlage der *unvollständigen, gestörten* Messung **und** unter Berücksichtigung von Modellvorstellungen zur Datenentstehung sowie verfügbaren a

priori-Problemwissen auf deren bildhafte Ursache zu schließen. Diese Aufgabenstellung gehört aus mathematischer Sicht zur Klasse der inversen, schlecht gestellten Probleme.

Erste Grundlagenarbeiten zum mathematischen Problem unterbestimmter Gleichungssysteme und zu deren Lösung gehen bereits in die 30er Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts zurück. Die praktische Anwendung dieses Methodenrepertoires im Bereich digitaler Bilder erfolgte ab etwa 1950 zeitgleich mit dem Beginn der Raumfahrt [BK97]. Dabei wurde das Ziel verfolgt, die Signalqualität zu verbessern und die Unzulänglichkeiten der damals eingesetzten analogen Aufnahme- und Übertragungstechnik mit mathematischen Mitteln zu korrigieren. Bedingt durch den Entwicklungsstand der Rechentechnik kamen dafür im Wesentlichen einfache direkte Restaurationsverfahren, wie das lineare Restaurationsfilter (Wiener-Filter), zum Einsatz. Mit zunehmender Verbreitung der elektronischen Datenverarbeitung wurde die Bilddatenrestauration in den folgenden Jahren auch in andere Anwendungsfelder, zum Beispiel die bildgebende Medizin, getragen.

Die weitere Entwicklung dieses Wissensgebietes stellte nicht zuletzt durch die Erfordernisse der verschiedenen Anwendungsfelder zunehmend die Problemregularisierung - das Lösungsaufbaumodell - in den Mittelpunkt. Von jeher wurden diese Entwicklungen auch von angrenzenden Wissensgebieten, wie der Physik, beeinflusst und inspiriert. Verfahrenseitig traten an die Stelle des direkten, schlecht konditionierten Lösungsrückschlusses zunehmend iterative oder rekursive Verfahren zur gut konditionierten Lösungsannäherung. Hervorzuheben sind an dieser Stelle erste parametrische Lösungsbeschreibungen, wie zum Beispiel das deterministische CLEAN-Modell, oder statistische Lösungsaufbaumodelle, wie zum Beispiel das Maximum-Entropie-Prinzip oder die Markov-Random-Fields. Ab Mitte der 1980er wird das Restaurationsproblem erstmals im Kontext probabilistischer Beschreibungen betrachtet und gelöst. Erste Ansätze zur Realisierung adaptiver Lösungsaufbaumodelle wurden bekannt und über erweiterte inverse Problemstellungen, wie zum Beispiel die Blind Deconvolution, wird in dieser Zeit erstmals berichtet.

Ein wichtiges Datum für die Entwicklung der Bilddatenrestaurations- und -rekonstruktionsmethoden war die Inbetriebnahme des Hubble-Space-Teleskops Anfang der 1990er. Dessen optischer Fehler führte aus der astronomischen Forschungslandschaft heraus zu einer Wiederbelebung und rasanten Fortentwicklung des bis dahin bekannten methodischen Wissens. In diesen Zeitraum fällt auch die **Pixonenmethode** [PP93a].

Dieses neuartige Prinzip der Regularisierung inverser Probleme durch Beschränkung der Freiheitsgrade der Lösungsbeschreibung verband zum damaligen Zeitpunkt die aktuellen Entwicklungstendenzen auf diesem Gebiet. Zunächst als abstrakte Idee publiziert, wurden in der Folge zahlreiche konkrete Interpretationen und Implementierungen veröffentlicht [DK99, HWD⁺93, DJK⁺96, DTZ⁺97, Eke01b, Eke01a, ETE09, HKNF03, MHK⁺96, AM97, Met99, PP94, PP93b, Pue94, Pue95, Pue96, PY99, PY00]. Der klassische Grundan-

satz mit einem Fuzzy-Pixonen-Lösungsaufbaumodell und das heuristische Lösungsverfahren zur Ableitung einer problemoptimalen Pixonenbasis [Pue94] ist dabei bis zur heutigen Zeit nahezu unverändert geblieben. Dieser Ansatz stellt den Ausgangspunkt für die eigenen Arbeiten dar.

Die Pixonenmethode und insbesondere das damit verbundene Lösungsaufbaumodell widmete sich zunächst ausschließlich Fragestellungen im Bereich der Restauration astronomischer Szeneninhalte. Mittlerweile sind einige Applikationen auch in anderen Anwendungsfeldern und auch in anderen Aufgabenklassen, wie der Bildsegmentierung, bekannt [DK99, KPYW03, LZYJ08, LJ01, LJ00, SA09, YJ03, ZCZ09]. Hierbei wird das zugrunde liegende Regularisierungsprinzip zunehmend weiter gefasst und zum Teil sehr frei interpretiert. Dies beweist die Aktualität dieser Methodenklasse bis in die heutige Zeit hinein.

Bestrebungen astronomische Fotoplattenarchive zu digitalisieren, gibt es bereits seit über 25 Jahren. Die dabei eingesetzte Gerätetechnik waren zunächst Speziallösungen, so genannte „Flying-spot“-Densitometer, die mit einer aufwendigen Mechanik versehen, Fotoplatten flächig erfassen konnten. Bekannte Beispiele sind die Automatic-Plate-Measuring-(APM)-Machine der Cambridge University, die Automated-Plate-Scanner-(APS)-Machine der Minnesota University oder die COSMOS- und SuperCOSMOS-Machines des Royal Observatory in Edinburgh. Mit dem stetigen Fortschreiten der Entwicklung von Kamera-, Beleuchtungs- und Positioniertechnik wurden ab 1990 hochpräzise, flächig ortsauflösende Mess- und Digitalisierungsvorrichtungen, wie die CCD-basierte Precision-Measuring-Machine (PMM) am United States Naval Observatory (USNO), geschaffen, mit denen das Aufkommen sehr umfangreicher Archive aus mehreren zehntausend Platten bewältigt werden konnten. Im kleinen Maßstab, das heißt für einen begrenzten Plattenumfang, wurde auch über Versuche mit herkömmlichen Flachbettscannern berichtet.

Das Sonneberger Plattenarchiv ist eine umfassende Sammlung fotografischer Himmelsüberwachungsaufnahmen des gestirnten Himmels über Sonneberg aus über 7 Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts. Das Plattenarchiv beinhaltet etwa 300000 photographische Aufnahmen ab 1923 bis in die Gegenwart. Es ist damit das Zweitgrößte dieser Art auf der Welt. Seit 1994 wird dieses Archiv systematisch, in einer nach astronomischen Prioritäten oder durch bereits einsetzende Zerfallsprozesse begründeten Reihenfolge mit ortsauflösenden CCD-Plattenscannern nach dem Durchlichtprinzip digitalisiert [KN94]. Für das Scannen eines Archivbestandes dieser Größe wurden dazu sehr leistungsfähige Scanneraufbauten (HISS¹-Scanner ab 1998) inklusive der zur Präprozessierung und Komprimierung benötigten Rechnercluster realisiert [KBF99]. Ein Großteil des digitalen Datenbestandes wurden mit

¹ Sonneberg-**H**igh-**S**peed **S**canner

diesen Scanvorrichtungen erzeugt. Dieses Datenmaterial stellt die Grundlage der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit dar.

Das Erschließen der astronomischen Informationen auf den Fotoplatten erfordert den weitestgehend automatischen Ablauf vordefinierter Verarbeitungsschritte¹. Dazu stehen eine Reihe leistungsfähiger, externer Softwarelösungen und -bibliotheken, wie zum Beispiel SExtractor [BA96] oder DAOPhot [Ste92], zur Verfügung. Deren Funktionsumfang umfasst die für die astronomische Datenanalyse essentiellen Funktionen, wie

- die **Datenvorverarbeitung**,
- die automatische **Vorder-/Hintergrund-Segmentierung** unter Berücksichtigung eines Punktbildes,
- die automatische **Objektdetektion und -klassifikation**,
- die **fotometrische und astrometrische Vermessung** von Objekten relational zu Referenzobjekten,
- die **Anbindung von Ergebnissen an bestehende Katalogdaten** sowie
- die **Visualisierung** und den **FITS-Datenimport-/export**².

Diese Softwarelösungen unterstellen vielfach idealisierte Abbildungsverhältnisse, das heißt bekannte, stationäre Punktbilder, und eine belichtungsproportionale Datenrepräsentation, das heißt ein lineares Detektormodell. Der digitalisierte Datenbestand der Sonneberger Platten erfüllt diese gestellten Voraussetzungen nicht.

Die charakteristischen Signaturen des optischen Instrumentes und der Aufzeichnungsmedien in den digitalisierten Plattendaten ziehen bei der Verwendung externer Software einen erheblichen platten- und plattenregionenspezifischen Einricht- bzw. Parametrierungsaufwand nach sich. Fotometrische Kennwerte lassen sich nur über regressive, nichtlineare Modellzusammenhänge zu Referenzobjekten ableiten. Besonders problematisch sind sehr schlecht definierte, lichtschwache Objekte in der Umgebung der fotometrischen Grenzempfindlichkeit des primären Aufzeichnungsmediums. Die Detektion und Charakterisierung dieser Objektklasse ist aus astronomischer Sicht von hervorgehobenem Interesse. Das sehr schlechte Signal-Rausch-Verhältnis im Ausgangsdatenmaterial führt an dieser Stelle zu Fehldetektionen und stark fehlerbehafteten, astrometrischen und fotometrischen Analyseergebnissen.

¹ Eine typische Fotoplatte enthält einige zehn- bis hunderttausend Objekte, deren manuelle Auswertung dagegen mehrere Wochen dauern würde.

² Das Flexible Image Transport System (FITS) ist seit 20 Jahren ein Standarddatenformat für astronomische Bilddaten, das durch die NASA entwickelt wurde. Das FITS-Fileformat beinhaltet neben den eigentlichen mehrdimensionalen Bilddaten zusätzlich auch datenbeschreibende Metainformationen.

Eine dem Bildanalyseprozess vorausgehende Datenrestauration, die die störenden, systematischen Einflüsse der Datenentstehung beseitigt und gleichzeitig den Einfluss von Rauschen reduziert, soll diese Probleme lösen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Bilddatenrestauration ist mehr, als das Anwenden einer Methode auf bildhaften Daten. Der erfolgreiche Einsatz für ein gewähltes Anwendungsszenario erfordert immer eine tiefgehende Auseinandersetzung mit dem zugrunde liegenden Problem und den untrennbar damit verbundenen Komponenten des Restaurationsprozesses. Diese sind die Datenmodellierung, die Regularisierung und das algorithmische Lösungskonzept. Der Aufbau dieser Arbeit ist von diesem Grundgedanken geleitet. Einen besonderen Stellenwert besitzt dabei die Problemregularisierung.

Auch wenn die Ausführungen in dieser Arbeit immer den engen Bezug zum diskutierten Anwendungsfall „Himmelsüberwachungsaufnahmen“, suchen, stellen die dargestellten Inhalte in dieser Form einen Ausgangspunkt zur Behandlung von inversen Problemstellungen in vielen weiteren Anwendungsfällen der wissenschaftlichen Bildanalyse dar.

Die Dissertation ist wie folgt gegliedert.

Der Gegenstand des Kapitels 2 sind grundlegende Ausführungen zum Restaurationsproblem und zur Bilddatenrestauration. Dazu gehören die Beschreibung des mathematischen Ausgangspunktes, die Charakterisierung der Restaurationsaufgabe als inverse Problemstellung in Abschnitt 2.2 sowie die Darstellung der Ursachen von Lösungsinstabilitäten und der Notwendigkeit zur adäquaten Problemregularisierung in Abschnitt 2.3.

Fester Bestandteil der Lösung des Bildrestaurationsproblems ist die möglichst realitätsnahe Beschreibung (Modellierung) des Verhaltens des Abbildungssystems über ein Datenentstehungsmodell. Häufig sind die Vorgänge der gesamten Abbildungstrecke nicht vollständig bekannt oder in ihrer Wechselwirkung sehr komplex, so dass anstelle einer physikalisch exakten Modellierung vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen. In Kapitel 3 werden die deterministischen (in Abschnitt 3.1) und die stochastischen Systemeinflüsse (in Abschnitt 3.2) bei der Abbildung der Messdatenursache in den Raum der Messdaten thematisiert.

Der herausragenden Bedeutung der Regularisierung im Rahmen des Restaurationsprozesses entsprechend wird diesem Verfahrensaspekt ein eigenes Kapitel 4 gewidmet. Ausgehend von den historischen Wurzeln der Regularisierung inverser Probleme werden Konzepte, Vorstellungen und Beschreibungen, wie die Regularisierung im Rahmen der Lösung des konkreten

Problems erfolgen kann, systematisch aufgeführt und diskutiert. Der Überblick zu Lösungsaufbaumodellen ist angesichts der Fülle der bekannten Ansätze und der Spezifik der zugehörigen Anwendungsfälle ausgerichtet auf die Restauration bzw. die Beschreibung astronomischer Bildinhalte. Die Ausführungen sind aufgrund der Vielzahl der in diesem Zusammenhang publizierten Ansätze dennoch sehr umfangreich und die Schlussfolgerungen auch auf andere Problemstellungen übertragbar. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz der Regularisierung über eine freiheitsgradbeschränkte, parametrische Lösungsbeschreibung wird anhand der in diesem Kapitel erarbeiteten Systematik am Ende dieses Abschnittes eingeordnet.

Das Kapitel 5 stellt den Verfahrensaspekt des Restaurationsproblems in den Mittelpunkt. Im Gegensatz zu bekannten Veröffentlichungen und Reviews wurde an dieser Stelle versucht, eine Ordnung herzustellen, die Verfahrens- und Lösungsmodellaspekte klar voneinander abgrenzt. Der Verfahrensüberblick diskutiert lediglich den Bezug zu Lösungsaufbaumodellen und die Eigenschaften der algorithmischen Lösung.

Von besonderer Bedeutung für die weiteren Ausführungen ist die Darstellung zu probabilistischen Problembeschreibungen und Lösungsverfahren in Abschnitt 5.3. Der probabilistische Ansatz ist formal keine eigenständige Herangehensweise zur Lösung eines inversen Problems, sondern ordnet sich dem indirekten Lösungsansatz unter. Er stellt einen besonderen abstrakten Beschreibungskontext dar, der den Fokus auf die probabilistischen Eigenschaften der Komponenten des Problems (Messdaten, Datenentstehungsmodelle, Lösungsaufbaumodelle) legt. Aus diesem Kontext leitet sich auch die Art und Weise des Rückschlusses auf eine Lösungs- oder Parameterkonfiguration für das gewählte Lösungsaufbaumodell ab. Die weiteren Betrachtungen zur Pixonenmethode und zum in dieser Arbeit entwickelten pixonenbasierten vollparametrischen Lösungsaufbaumodell erfolgen konsequent aus diesem Zusammenhang heraus.

Das Kapitel 6 behandelt das Prinzip der Regularisierung über freiheitsgradbeschränkte Lösungsbeschreibungen, zu deren Vertretern die Pixonenmethode zählt. Den Ausgangspunkt bilden Betrachtungen zum Freiheitsgradbegriff im Zusammenhang mit der Entstehung und Vermeidung von Restaurationsartefakten. Die nachfolgenden Darstellungen in den Abschnitten 6.2-6.5 widmen sich der Analyse der bekannten Realisierungen der pixonenbasierten Regularisierung.

Der Gegenstand des Abschnittes 6.6 ist die Darstellung eines eigenen pixonenbasierten Ansatzes zur Regularisierung auf Grundlage eines Fuzzy-Pixonen-Modells mit parametrischer Pixonenbasis. Vor dem Hintergrund das Potential dieser Methode und die Flexibilität des pixonenbasierten Lösungsaufbaumodells für unterschiedliche Anwendungsfälle in der wissenschaftlichen Bildanalyse weiter auszuschöpfen, werden Modellvarianten und -erweiterungen, wie zum Beispiel das Konzept der parametrischen Signalentkopplung (Abschnitt 6.6.4) oder

der Lösungsaufbau mit multivariaten Aufbauelementen (Abschnitt 6.6.5) diskutiert und im Kontext des vorgeschlagenen Lösungsverfahrens evaluiert. Eine besondere Rolle kommen in diesem Zusammenhang den Überlegungen zur Realisierung einer Pixonenbasis aus Aufbauelementen mit approximiert kontinuierlichen Gestaltungsparametern zu 6.6.6. Das Prinzip einer kontinuierlichen Pixonenbasis ist aus heutiger Sicht völlig neu. Ausführungen zur Verfahrenskomplexität und zu Möglichkeit der Beeinflussung der Verfahrenslaufzeiten ab (Abschnitt 6.6.7) schließen dieses Kapitel ab.

Das Kapitel 7 beinhaltet die Aufarbeitung des diskutierten Applikationsfalls für die Evaluierung des entwickelten Restaurationsverfahrens. Dazu zählen die umfassende Charakterisierung der sehr spezifischen Datengrundlage (in Abschnitt 7.2) und der Entwurf eines Datenentstehungsmodells für den Restaurationsprozess (in Abschnitt 7.3). An dieser Stelle werden sehr viele Querbezüge zur Datenmodellierung in den vorangegangenen Abschnitten 3.1 und 3.2 hergestellt.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte pixonenbasierte Restaurationsverfahren wurde an einer Vielzahl realer Plattendaten sowie synthetisch erzeugten Datenszenarien getestet. Aus der Darstellung der Ergebnisse in Abschnitt 7.4 geht hervor, ob und unter welchen Randbedingungen die formulierten Zielstellungen der Bilddatenrestauration in diesem Anwendungsfall erreicht werden können.

Das Kapitel 8 fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick zu offenen Fragen, die Gegenstand der weiteren Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet sein sollten.

Im Anhang A finden sich die mathematischen Herleitungen der Gütefunktionale und Gradienten zur Optimierung der Lösungskomponenten des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells für das propagierte Lösungsverfahren. Der Anhang B charakterisiert die Aufbauelemente parametrischer Pixonenbasen einschließlich der zur quasi-simultanen Lösungsannäherung benötigten differenziellen Aufbauelemente.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Die Lösung einer Restaurationsaufgabe setzt die intensive Auseinandersetzung mit dem damit verbundenen Problem voraus. Davon geleitet, versucht die vorliegende Arbeit einen sehr umfassenden Überblick zum facettenreichen Themengebiet der Bilddatenrestauration zu geben. Dabei besitzen neben den reinen Verfahrensaspekten auch die Modellierung der Datenentstehung und die modellhafte Einbeziehung des verfügbaren Problemwissens einen großen Stellenwert. Für diese Aufgabenklasse von besonderer Bedeutung ist die Regularisierung. Sie ist die Voraussetzung dafür, aus einer häufig unvollkommenen und gestörten Datengrundlage Lösungen mit erwarteten, physikalisch plausiblen Eigenschaften abzuleiten. Dementsprechend ist die Auseinandersetzung mit diesem Lösungsaspekt besonders intensiv erfolgt.

Die Umsetzung der hier präsentierten Lösung ist letztlich das Resultat dieser ganzheitlichen Betrachtung des Bildrestaurationsproblems im Kontext der Prozessierung digitalisierter Fotoplaten der astronomischen Himmelsüberwachung.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht ein pixonenbasiertes Lösungsaufbaumodell zur Problemregularisierung. Ausgehend von der 1993 publizierte Idee und den bis zum Beginn der eigenen Arbeit auf diesem Gebiet im Jahre 2002 bekannten Umsetzungen wurde dieses Prinzip in einer vollständig parametrischen Form interpretiert und umgesetzt. Dies betrifft sowohl den Lösungsaufbau und dessen Elemente, die Pixonen, als auch das Verfahren zur Ermittlung einer problemoptimalen Lösungskonfiguration. Der Ausgangspunkt war dabei die tiefgehende Analyse des zugrunde liegenden Regularisierungsprinzips der freiheitsgradbeschränkten Lösungsbeschreibung. Ausgehend von der zunächst abstrakten Vorstellung der Rolle des Freiheitsgradbegriffs im Rahmen der Problemregularisierung lässt sich dieses Prinzip aus einem probabilistischen Zusammenhang heraus auch praktisch interpretieren. Dies führt zu einem Lösungsaufbaumodell, das aus variablen, generalisierenden Aufbauelementen besteht.

Die vom Grundsatz her logische Ableitbarkeit sowohl der Modellkomponente als auch der datenangepassten Signalkomponente mittels Bayesschem Rückschluss wird in den bekannten Realisierungen nicht konsequent umgesetzt. Dies gilt insbesondere für die Bestimmung der Modellkomponente des Lösungsaufbaumodells, die sehr heuristisch erfolgt. Die in dieser Arbeit dargestellte Vorgehensweise versucht stattdessen diesen Weg folgerichtiger zu gehen. Der universelle Regularisierungsansatz des pixonenbasierten Aufbaus beruht auf der datenadaptiven Beschränkung der Freiheitsgrade der Lösungsbeschreibung. Damit kann die in den Messdaten enthaltene szenenbeschreibende Information optimal genutzt werden. Gleichzeitig wird das bestehende Informationsdefizit für eine vollständige Lösungsbeschreibung, das eine Ursache für Restaurationsartefakte ist, durch den inneren Modellzusammenhang des pixonenbasierten Lösungsaufbaus ausgeglichen. Erreicht wird dies hier über das parametrische Fuzzy-Pixonen-Modell, das in diesem Fall die Bezüge über regional individuell gestaltete parametrische Aufbauelemente herstellt.

Das Wissen zur unbekanntem Messdatenursache widerspiegelt sich in der a priori Auswahl der Aufbauelemente, die in die problemoptimale Pixonenbasis einbezogen werden können. An bekannte strukturelle Szeneneigenschaften angepasste Aufbauelemente führen zu einer Verkleinerung der Vielfalt darstellbarer Lösungen und damit gleichzeitig zu einer Vergrößerung der Regularisierungswirkung. Ungeachtet dessen bleibt auch bei Wahl eines Pixonenumfangs mit unspezifischen, universellen Formeigenschaften die Fähigkeit zur Darstellung datenkonsistenter Lösungen erhalten, wenngleich die Empfindlichkeit gegenüber Messunsicherheiten deterministischer und systematischer Natur (Messartefakte) zunimmt.

Die ersten Überlegungen zur Gestaltung des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells waren zunächst ausgerichtet auf den Einsatz im Rahmen der Restauration astronomischer Szenen-inhalte. Die Zielstellung dabei ist die Realisierung einer artefaktfreien Datenrepräsentation ohne deterministische Messsystemsignaturen und ohne störenden Signaleintrag durch die Messunsicherheiten. Mit diesem Modell sind jedoch auch Lösungen mit anderem Aufbau und davon abweichenden Gestaltseigenschaften beschreibbar. Erste experimentelle Untersuchungen von Anwendungsfeldern, wie der Restauration bildhafter Messdaten von synthetischen Objekten aus der Atomkraftmikroskopie [NMFS07, NMFS08], bestätigen die prinzipielle Eignung des pixonenbasierten Lösungsaufbaus auch in diesen Fällen. Der Einsatz dieses Regularisierungsprinzips ist immer dann angebracht, wenn inverse Problemstellungen, wie die Entfaltung oder die Rauschreduktion, unter sehr schwierigen Signalverhältnissen zu lösen sind. Dabei sind nicht nur Daten optischer Sensoren, sondern einer Vielzahl weiterer bildgebender Aufnahmeprinzipien mit naturgemäß schlechter Datenqualität im Blickpunkt.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Erweiterungen des parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells, wie das Prinzip der parametrischen Signalentkopplung zur besseren Darstellbarkeit kontrastreicher Szenen oder die multivariate Pixonenbasis zur flexiblen Beschreibbarkeit von

Szeneninhalten mit Vorzugsrichtungen, die sich in den vorgestellten Lösungsansatz einfügen, schaffen dafür die notwendigen Voraussetzungen.

Nur in dem vorliegenden Lösungskonzept überhaupt darstellbar und gänzlich neu ist das Prinzip der approximiert kontinuierlichen Pixonenbasis. Dabei können anhand des üblicherweise begrenzten diskreten Umfangs an Aufbauelementen problemoptimale, kontinuierlich parametrisierte Aufbauelemente realisiert werden. Diese Möglichkeit führt zu einer genaueren Anpassung der Lösungskonfiguration an die Problembeschreibung und vor allem zu einer besseren numerischen Lösbarkeit des damit verbundenen Optimierungsproblems. Schwierigkeiten, die bis dahin wegen der komplexitätsbedingt groben Diskretisierung der Aufbauelementeparameter auftraten, sind damit überwindbar. Die Ableitung der problemoptimalen, kontinuierlichen Pixonenbasis kann mit etablierten Verfahren der kontinuierlichen Optimierung erfolgen. Damit werden sämtliche parametrischen Komponenten des Lösungsaufbaumodells innerhalb des Lösungskonzeptes durch ein einheitliches algorithmisches Vorgehen bestimmt. Die Zunahme der Modell- und Verfahrenskomplexität kann durch die deutliche Verringerung des Pixonenumfangs kompensiert werden. Die positiven Effekte, die aus dieser Vorgehensweise resultieren, bleiben dabei erhalten.

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Anwendungsszenario ist die Restauration astronomischer Himmelsüberwachungsaufnahmen des Sonneberger Plattenarchivs. Der wissenschaftliche Nutzen für die astronomischen Bildanalyse, der aus der Verfügbarkeit restaurierter Daten folgt, ist beträchtlich [HKNF03]. Insbesondere ist die weitestgehend rausch- und artefaktfreie Rückgewinnung der ursprünglichen Szeneninformation aus den stark gestörten und unvollständigen Messdaten bemerkenswert. Die dabei hergestellte Datenrepräsentation mit dem stationären, symmetrischen Punktbild eines idealisierten linearen Abbildungssystems eignet sich für die typischen astrometrischen und fotometrischen Untersuchungen oder für die Identifikation und Klassifikation bislang unbekannter, stellarer Objekte gleichermaßen gut. Der Einricht- und Parametrierungsaufwand beim Einsatz externer Softwarelösungen zur automatischen Klassifikation und Analyse ist auf dieser Datengrundlage gegenüber den nicht restaurierten Daten erheblich reduzierbar. Es ist gut vorstellbar, dass so die Produktivität und Güte der astrometrischen und fotometrischen Auswertung von Platteninhalten wesentlich gesteigert werden kann. Fallstudien zum Nachweis wurden zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit der Sternwarte Sonneberg e.V. vorbereitet. Diese haben die Auswertung langer Zeitserien von stellaren Objekten mit vermuteter fotometrischer oder astrometrischer Veränderlichkeit zum Gegenstand. Die umfangreiche Sichtung und Aufbereitung der Daten dauert aktuell noch an.

Es gilt dennoch als sicher, dass auf einer restaurierten Datengrundlage das Erschließen der astronomischen Informationen des Plattenarchivs zukünftig umfassender, präziser und effizienter erfolgen kann.

Die Voraussetzung für den Restorationsschritt ist die Analyse und modellhafte Beschreibung des vorliegenden Datenmaterials. Herausfordernd war im vorliegenden Fall der Entwurf einer adäquaten Datenmodellierung für die mehrstufigen optischen, fotochemischen und fotoelektrischen Wandlungsprozesse während der Datenentstehung und die statistische Modellierung der komplexen Messunsicherheiten. Bedingt durch das leistungsfähige, adaptive Regularisationsprinzip können irrelevante Datenbestandteile, deren korrekte Charakterisierung normalerweise erforderlich ist, um Restorationsartefakte zu vermeiden, hier sehr vereinfacht und gut handhabbar beschrieben werden.

Mit den heutzutage verfügbaren Rechnern liegt die Laufzeit des Verfahrens problemgrößen- und vor allem szeneninhaltsabhängig im Minuten- für große Plattenabschnitte im Stundenbereich. Das widerspricht dem ursprünglichen Bestreben, das Verfahren als Bestandteil einer automatisierten Verarbeitungskette für komplette Plattenscans aufzunehmen. Die problembezogene Verfahrenskomplexität lässt in serialisierter Ausführung ohne deutliche Einschränkungen der Komplexität des Lösungsaufbaumodells kaum Verbesserungen in der notwendigen Größenordnung zu. Darüber hinaus schöpfen derartig reduzierte Lösungen die Möglichkeiten des Regularisierungsprinzips nur ungenügend aus. Typisch für Anwendungen in der wissenschaftliche Bildanalyse ist der große Stellenwert der Ergebnisgüte vor der Erfüllung von Laufzeitanforderungen.

Der Schlüssel zu einem deutlich beschleunigten Verfahrensablauf liegt in der Nutzung paralleler Verarbeitungsprinzipien auf unterschiedlichen Ebenen und der parallelisierten Prozessierung von Datenpartitionen. Das Potential der Hardwareprozessierung häufig wiederkehrender, laufzeitkritischer Operationen des Lösungskonzeptes, wie die Fouriertransformation, mit hochgradig datenparallelen Verarbeitungseinheiten (GPGPU) wurde nachgewiesen [KNMF10]. In Verbindung mit einer verteilten Berechnung von Datenabschnitten auf der Ebene komplexerer, auch serialisierter Codebeschreibungen, zum Beispiel auf Rechnerclustern, ist die Laufzeit an die Erfordernisse des jeweiligen Anwendungsfalls anpassbar. Der praktische Nachweis des Effektes der Einbeziehung von kooperativen Systemeinheiten wie CPU und GPGPU in den algorithmischen Ablauf muss in der weiteren Forschungsarbeit erbracht werden.

Aus methodischer und verfahrensmäßiger Sicht steht dem weitestgehend automatischen Prozessierungsablauf entgegen, dass die dem eigentlichen Restorationsschritt vorausgehenden Prozessierungsschritte, wie die Sektorierung des Plattenbereiches, die Maskierung von Prozess- und Datenartefakten oder die Anpassung und Parametrierung des Datenentstehungsmodells (noch) nicht automatisiert ausführbar sind. Die automatische Segmentierung in Abhängigkeit vom ortsabhängigen Unschärfefluss und die optimale Zuordnung des repräsentativen Punktbildes zu einem Plattenbereich ist derzeit noch ein intensives offenes Forschungsgebiet der Blind Deconvolution.

Die Analyse astronomischer Objekte erfolgt in der Praxis oft in kleinen abgegrenzten Regionen und auf Basis bekannter Referenzen. Die Vorzüge des Restaurationsverfahrens kommen bei einer manuell selektierten Auswahl von kleineren Plattenregionen unmittelbar zum Tragen. Die Laufzeiten liegen in diesem Fall in einer Größenordnung, die durch die hohe Güte der Lösung gerechtfertigt wird. Die sich an den Restaurationsschritt anschließende Auswertung des Platteninhaltes kann auf dieser Grundlage erheblich effizienter erfolgen.

Die Bereitstellung von restaurierten bzw. reduzierten Plattendaten für externe astronomische Datenanalyse ist ein Fernziel der Sternwarte Sonneberg e.V. . Über den wissenschaftlichen Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen bietet sich die Möglichkeit, den außergewöhnlichen Fundus an astronomischen Informationen des digitaler Plattenarchivs der Sternwarte Sonneberg zu erschließen. Für derartige Überlegungen kann das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren einen wesentlichen Schlüssel darstellen.

Von Seiten des pixonenbasierten Lösungsaufbaumodells offen geblieben sind Untersuchungen zur Verbindung der multivariaten Pixonenbasis mit dem Konzept der approximiert kontinuierlichen Aufbauelemente. Gerade hier wird erwartet, dass die Erreichbarkeit problemoptimaler Lösungskonfigurationen durch den Übergang vom diskreten zu einem kontinuierlichen Optimierungsproblem wirksam unterstützt werden kann. Bislang werden unter der Voraussetzung sehr grober Parameterabstufungen akzeptable Ergebnisse nur über aufwendige Heuristiken erreicht. Die Übertragbarkeit einer erarbeiteten Lösungsstrategie auf andere Problemstellungen ist damit nur beschränkt möglich. Eine beliebig feine parametrische Auflösung führt gerade im multivariaten Fall zu einem stark anwachsenden diskreten Pixonenumfang. Die resultierende Komplexität des Verfahrens ist dann in den meisten Fällen nicht mehr beherrschbar.

Ebenfalls im Zusammenhang mit multivariaten Beschreibungen ist das Prinzip der parametrischen Signalentkopplung noch nicht abschließend untersucht. Bislang erfolgt die Signalentkopplung anhand der Konfiguration der freiheitsgradrelevanten Aufbauelementeparameter. Insbesondere bei Aufbauelementen mit starken Vorzugrichtungen müssen zur Steuerung der Zuordnung von semantisch zugehörigen Signalbeiträgen für den Lösungsaufbau auch die übrigen Parameterkategorien einbezogen werden. An dieser Stelle sind Untersuchungen zu nutzbaren problembezogenen Heuristiken und deren Einbeziehung in den parametrischen Lösungsansatz erforderlich.

Bestandteil der weiteren Arbeit sind darüber hinaus Strategien, wie sich unter Berücksichtigung der Gestaltungselemente des entwickelten parametrischen Fuzzy-Pixonen-Modells für ein Problem eine optimale Modellkonfiguration und Lösungsschrittfolge finden lässt.

Nach wie vor ein Gebiet intensiver Forschung bleibt das Finden optimaler Regularisierungsterme und Regularisierungskonstanten im Rahmen der Ableitung der Signal- und Modellkomponenten der Lösungskonfiguration des pixonenbasierten Aufbaumodells. Beim hier

vorliegenden Lösungsaufbaumodell ist die Regularisierungswirkung ein fester innerer Bestandteil der gesamten Problembeschreibung. Das Problem der adäquaten Wichtung zwischen rein datengetriebener und rein modellgetriebener Lösungsgestalt, wie es Gegenstand der klassischen Regularisierung ist, liegt auf der Ebene der pixonenbasierten Lösungsbeschreibung prinzipbedingt nicht vor. Ein vorläufiges Ergebnis der Untersuchungen ist die Feststellung, dass der Stellenwert der Regularisierung der Lösungskomponenten infolge der durch den inneren Modellzusammenhang allgegenwärtigen Beschränkungen des Lösungsaufbaumodells nur gering ist. Die isolierte Beeinflussung einer Lösungskomponente kann bezogen auf die realisierten Lösungseigenschaften kontraproduktiv sein. Diese Vermutungen sollten durch weitere Untersuchungen evaluiert werden.

Die hier dokumentierten Ergebnisse markieren daher keinen Endpunkt einer Entwicklung, sondern sie sind eine Zwischentappe, die Ausgangspunkt für die weitere Forschungstätigkeit in diesem Wissensgebiet sein sollte.

ISBN 978-3-938843-74-1