

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

INSTITUT FÜR TECHNISCHE INFORMATIK, PROFESSUR FÜR  
RECHNERARCHITEKTUR  
PROF. DR. WOLFGANG E. NAGEL

## Bachelor-Arbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science

# Parallelisierung des Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus auf Multicore-Prozessoren

Jonas Schenke  
(Geboren am 17. September 1995 in Burgstädt)

Hochschullehrer: Prof. Dr. Wolfgang E. Nagel  
Zweitgutachter: Prof. Thomas E. Cowan, PhD  
Betreuer: Dr. Elena-Ruxandra Cojocaru, Dr. Michael Bussmann, Matthias  
Werner

Dresden, 5. März 2018



---

## Aufgabenstellung

- Evaluierung und Performance-Analyse des derzeit fast durchgängig seriellen Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus
- Parallelisierung der kritischen Pfade für Vielkernarchitekturen
- Performance-Messungen der parallelen Implementation
- Auswertung sowie Validierung der Ergebnisse



---

# Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag dem Prüfungsausschuss der Fakultät Informatik eingereichte Bachelor-Arbeit zum Thema:

*Parallelisierung des Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus auf Multicore-Prozessoren*

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 5. März 2018

Jonas Schenke



---

## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Beschleunigung des von Elena-Ruxandra Cojocaru und Sébastien Béruron in Python implementierten Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus. Dieser berechnet aus zwei Bildern einer Probe pixelweise die Fronten der elektromagnetischen Welle eines Röntgenlasers. Die Bilder werden hierbei von zwei hochempfindlichen Röntgen-CCD-Sensoren aufgenommen, welche in einem festen Abstand zueinander und zur Probe positioniert sind. Treffen Strahlen des Röntgenlasers auf diese, so lässt sich aus den so aufgenommenen Streubildern die Wellenfront rekonstruieren, was Rückschlüsse auf die Struktur der Probe zulässt. Auf Basis von Performance-Analysen der Python-Implementierung wurden Optimierungen und Parallelisierungsmöglichkeiten für die kritischen Programmabschnitte ermittelt, implementiert und evaluiert. Die schnellste vorgestellte Lösung basiert auf der Verteilung der Bildpaare auf mehrere Rechenkerngruppen und der Parallelisierung der Berechnung der Bildpaare auf diesen, was eine Skalierung über mehrere Knoten erlaubt. Kombiniert mit der Nutzung optimierter Bibliotheken und dem Übersetzen des Python-Codes wurde eine Beschleunigung von bis zu vier gegenüber der Referenzimplementierung mit gleicher Kernanzahl erreicht. Wurden 120 Kerne verwendet, so war eine Beschleunigung auf das bis zu 133-fache gegenüber der Referenz auf einem Kern möglich. Die Referenzdaten hierfür wurden an der Beamline BM05 der European Synchrotron Radiation Facility aufgenommen.

## Abstract

The goal of this thesis was the acceleration of the wavefront reconstruction algorithm which was developed in Python by Elena-Ruxandra Cojocaru and Sébastien Béruron. This algorithm calculates the electromagnetic wavefront of an X-ray laser from two images of a target pixelwise. The images were captured by two highly sensitive X-ray CCD sensors, which were positioned in a fixed distance to each other and the target. When the refracted X-ray beam hits these detectors a distortion image is generated from which the wavefront can be reconstructed. The result can be used to draw conclusions about the structure of the target. On the basis of performance measurements of the Python implementation optimization and parallelization possibilities for critical sections were determined, implemented and evaluated. The fastest proposed solution is based on the distribution of the image pairs onto CPU core groups and the parallelization of the calculation of the image pairs on these which allows scaling the problem over multiple nodes. This combined with the use of optimized libraries and the compilation of the Python code resulted in a speedup of up to four towards the reference implementation without the use of more cores. When using 120 cores a speedup of up to 133 towards the reference implementation running on a single core could be achieved. The here used datasets were recorded at Beamline BM05 of the European Synchrotron Radiation Facility.





# Inhaltsverzeichnis

Danksagung . . . . .	1
Glossar . . . . .	5
Abkürzungen . . . . .	5
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2 Der Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus</b>	<b>9</b>
2.1 Verwandte Arbeiten . . . . .	9
2.1.1 Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus . . . . .	9
2.1.2 Python-Optimierungen . . . . .	9
2.2 Einführung . . . . .	10
2.2.1 Versuchsaufbau . . . . .	10
2.2.2 Kalibrierung der CCD-Sensoren . . . . .	11
2.2.3 Verarbeitungsroutine der Bilder . . . . .	13
2.3 Die vorgegebene Python-Implementierung . . . . .	14
2.3.1 Überblick . . . . .	15
2.3.2 Die wichtigsten Funktionen . . . . .	16
<b>3 Performance-Analyse der vorgegebenen Python-Implementierung</b>	<b>19</b>
3.1 Komplexitätsanalyse . . . . .	19
3.1.1 Speckle-Tracking . . . . .	19
3.1.2 Integration der Gradienten . . . . .	20
3.1.3 Verarbeitungsroutine der Bilder . . . . .	20
3.2 Performance-Messungen . . . . .	20
3.3 Performance-Engpässe . . . . .	24
3.4 Prüfen der Ergebnisse . . . . .	24
<b>4 Parallelisierung der kritischen Abschnitte</b>	<b>25</b>
4.1 Parallelisierung . . . . .	25
4.1.1 Parallelisierung der Verarbeitung einzelner Bildpaare mittels MPI . . . . .	25
4.1.2 Parallelisierung innerhalb der Verarbeitung einzelner Bildpaare mittels MPI . . . . .	25
4.2 Optimierung der Performance-Engpässe in Python . . . . .	26
4.2.1 Nutzen bereits optimierter Funktionen . . . . .	27
4.2.2 Kompilieren . . . . .	28
<b>5 Performance-Messungen der parallelen Implementation</b>	<b>31</b>
5.1 Evaluierung der Optimierungen . . . . .	31
5.1.1 Parallelisierung . . . . .	31
5.1.2 Optimierung von Python-Engpässen . . . . .	32
5.2 Skalierung . . . . .	33
<b>6 Auswertung</b>	<b>37</b>
6.1 Wertung des Ergebnisses . . . . .	37
6.2 Verbesserungsmöglichkeiten . . . . .	37
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>43</b>

<b>Listings</b>	<b>45</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>47</b>

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit fachlich und persönlich unterstützt haben. Besonderer Dank gilt hierbei Herr Prof. Wolfgang E. Nagel, der sich als betreuender Hochschullehrer des Themas angenommen hat. Weiterer besonderer Dank gilt meiner Betreuerin, Dr. Elena-Ruxandra Cojocaru, und meinen Betreuern, Dr. Michael Bussmann und Matthias Werner, welche mir bei Problemen und Fragen stets zeitnah zur Hilfe standen und auch mit konstruktiver Kritik nie sparsam umgingen.

Des Weiteren möchte ich mich auch besonders bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Beamline BM05 der European Synchrotron Radiation Facility für die Bereitstellung der hier genutzten Datensätze bedanken.

Danken möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V., welche mir zum Thema Hochleistungsrechnen und Python immer Rat geben konnten.

Weiterhin möchte ich dem Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e.V. und der European Synchrotron Radiation Facility dafür danken, dass diese sich auf eine Kollaboration eingelassen haben.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meinen Kommilitonen und Eltern, welche mich immer wieder durch aufmunternde Gesten motiviert haben.



## Glossar

$N_{Paare}$  Anzahl der Bildpaare

$N_{Pos}$  Anzahl der Sensorpositionen

$N_{corr}$  Anzahl der Korrekturversuche

$N$  Anzahl der Bilder

$P_u$  Unterabtastperiode

$R_{Block}$  Auflösung der Blöcke

$R_{ROI}$  Auflösung der Region von Interesse

$R_{corr}$  Korrelationsgröße bzw. Korrelationsauflösung

$R_{grid}$  Gitterauflösung

$R$  Auflösung

## Abkürzungen

**CCD** Charge-Coupled Device

**CPU** Central Processing Unit

**ESRF** European Synchrotron Radiation Facility

**EUCALL** European Cluster of Advanced Laser Light Sources

**FFT** Fast Fourier Transformation

**GB** Gigabyte

**GHz** Gigahertz

**GiB** Gibibyte

**GPGPU** General Purpose Computing on Graphics Processing Unit

**HZDR** Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.

**I/O** Input/Output

**JIT** just-in-time

**MPI** Message Passing Interface

**PUCCA** Pulse Characterisation and Control

**ROI** Region of Interest (Region von Interesse)

**SSD** Solid-State Drive

**UFDAC** Ultrafast Data Acquisition



# 1 Einleitung

Die Programmiersprache Python erfreut sich heutzutage besonders bei Physikern hoher Popularität. Sie ist einfach zu bedienen und bietet Zugriff auf eine große Ansammlung physikalischer Hilfsbibliotheken, was unter anderem auch die Portierung von MATLAB-Code vereinfacht. Der hier zu parallelisierende Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus wurde auf diese Weise von Elena-Ruxandra Cojocaru auf Grundlage des von Sébastien Béruton entwickelten MATLAB-Codes an der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) zu Python portiert. Die Aufgabe dieses Algorithmus ist es, aus zwei Bildern eines zu untersuchenden Objektes, die Fronten der elektromagnetischen Welle eines Röntgenlasers zu rekonstruieren. Die Bilder werden hierbei von zwei hochempfindlichen Röntgen-CCD-Sensoren aufgenommen, welche in einem festen Abstand zueinander positioniert sind. Diese haben jeweils eine Auflösung von 2048 mal 2048 Pixeln und können bis zu zehn Bilder in einer Sekunde aufnehmen.

Der vorgegebene Python-Code benötigt jedoch pro Bildpaar mehr als 500 Sekunden auf einem Kern eines Intel®Xeon® E5-2680 v3 Central Processing Units (CPUs). Selbst unter der Nutzung von 24 dieser Rechenkerne unterschreitet die Laufzeit pro Bildpaar die 100-Sekunden-Grenze nicht.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Laufzeit des Algorithmus näher an eine mögliche Echtzeitausführung des Programmes zu bringen. Dabei soll die hier präsentierte Lösung eine möglichst gute Skalierung einerseits mit den Bildpaaren und andererseits mit den CPU-Kernen liefern. Auch eine einfache Erweiterbarkeit des Python-Codes ist erwünscht.

Um diese Kriterien erfüllen zu können, wurde daher zuerst der von Cojocaru *et al.* entwickelte Code bezüglich seiner Performance evaluiert. Diese Kenntnisse wurden anschließend für die Parallelisierung und weitere Optimierung genutzt. Hierbei wurden verschiedene Optimierungsmöglichkeiten betrachtet, welche sich vor allem mit der Nutzung bereits optimierter Bibliotheken und dem Übersetzen des Programmes in Maschinencode befassen. Zum Schluss wurden die Optimierungen bezüglich des erreichten Beschleunigungsfaktors gegenüber der Referenzimplementierung evaluiert.

Die hier verwendeten Datensätze wurden von Elena-Ruxandra Cojocaru, Sébastien Béruton und Eric Ziegler am 24. September 2017 und von Thomas Roth, Raymond Barrett, Sébastien Béruton und Rafael Celeste am zehnten April 2017 an der Beamline BM05 der ESRF aufgenommen. Diese Arbeit wurde als Teil des European Cluster of Advanced Laser Light Sources (EUCALL)-Projekts am Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V. (HZDR) geschrieben, welches von der Europäischen Union finanziert wird. Konkret ist diese Arbeit ein übergreifendes Projekt über die Arbeitspakete WP5 (Ultrafast Data Acquisition (UFDAC)) und WP7 (Pulse Characterisation and Control (PUCCA)).





## 2 Der Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus

### 2.1 Verwandte Arbeiten

#### 2.1.1 Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus

In strahlenphysikalischen Experimenten spielt die Ausrichtung optischer Bauteile und deren Qualität eine entscheidende Rolle. Guizar-Sicairos *et al.* beschrieben 2011 Methoden zur Messung dieser Fehler und zur Rekonstruktion der Wellenfront [Gui+11]. Während der letzten zwei Jahrzehnte wurden hierzu verschiedene Techniken vorgestellt. Mercère *et al.* stellten 2003 ein Verfahren zur Ermittlung der Wellenfront unter Nutzung eines Hartmann-Sensors vor [Mer+03]. 2005 wurde von Weitkamp *et al.* eine Methode zur Wellenfrontrekonstruktion mittels eines Gitterinferometers vorgestellt [Wei+05]. Anand *et al.* präsentierten 2007 eine weitere Methode basierend auf der Verwendung einer Zufalls-Amplituden-Maske [Ana+07]. Diese umgeht das Problem der niedrigen räumlichen Auflösung eines Hartmann-Sensors und die aufwendige Kalibrierung der Optik eines Interferometers, indem mehrere Bilder in unterschiedlicher Entfernung vom zu untersuchenden Objekt gemacht werden. Dies bietet eine höhere Auflösung und die Möglichkeit, Ungenauigkeiten in der Optik algorithmisch zu korrigieren. Ein ähnlicher, robusterer Ansatz wurde 2012 von Bérújon *et al.* unter Zuhilfenahme des X-Ray-Speckle-Traking-Algorithmus verfolgt [Bér+12] und 2013 wurde von Bérújon eine Methode mit zwei Sensoren vorgestellt, welche simultan Bilder des zu untersuchenden Objektes aufnehmen können und somit schneller sind [Bér13]. Auf dieser Methode basiert der hier behandelte Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus.

#### 2.1.2 Python-Optimierungen

Es wurde von Oliphant und Perez *et al.* aufgezeigt, dass die Programmiersprache Python aufgrund ihrer Simplizität und der Verfügbarkeit vieler Bibliotheken sich gut für wissenschaftliche Berechnungen eignet [Oli07; PGH11]. Da Python als Skriptsprache nicht besonders schnell ist, wurde sich bereits ausgiebig mit dem Thema Beschleunigung von Python-Code beschäftigt. Die Lösungsansätze reichen von der Verwendung optimierter Bibliotheken über das Kompilieren kompletter Programme bis hin zur Vektorisierung und Parallelisierung des Codes. 2009 wurde von Ben Asher *et al.* sogar eine auf Loop-Unrolling und Bytecode-Optimierung basierende Methode vorgestellt [BR09]. Illmer hat 2014 einen Überblick über verschiedene Optimierungen gegeben und deren Effektivität anhand des freewake-Algorithmus aufgezeigt [Ill14].

**Kompilieren** Behnel *et al.* zeigten, dass mithilfe des Cython-Compilers und dessen Erweiterungen für Python unter bestimmten Szenarien die 1000-fache Geschwindigkeit erreicht werden kann. Dies ist möglich, indem der für Cython optimierte Python-Code nach C/C++ übersetzt und kompiliert wird [Beh+11]. Ein weiterer, nennenswerter Python-zu-C++-Compiler ist der Shed-Skin-Compiler [Duf09]. Lam *et al.* präsentierten 2015 numba, einen Python Just-In-Time-Compiler [LPS15]. Dieser unterstützt unter anderem auch Annotationen, mit denen sich einzelne Python-Funktionen unabhängig vom Rest des Programmes just-in-time (JIT) in nativen Code übersetzen lassen.

**Vektorisierung** Wie man mittels Pythran und Boost.SIMD Python vektorisieren kann, wurde 2014 von Guelton *et al.* gezeigt [GFB14]. Eine weitere Möglichkeit bietet die numpy-Bibliothek, welche eine einfache Anwendung von Rechenoperationen auf ganze Arrays zulässt. Die wichtigsten Funktionen der numpy-Bibliothek wurden von Walt *et al.* dargelegt. Daily stellte 2009 eine Bibliothek vor, die ähnliche Verfahren über mehrere Rechner verteilen kann [Dai09]. Guelton *et al.* stellten 2013 einen Ansatz vor,

mit dem sich auch OpenMP in Python nutzen lässt [GBA13]. Eine MPI-1-Implementierung existiert ebenfalls und wurde 2005 von Dalcín *et al.* vorgestellt und 2008 von Dalcín *et al.* auf MPI-2 erweitert [DPS05; Dal+08]. Die Verteilung der Daten auf verschiedene Rechenknoten kann erheblichen Einfluss auf die Leistung des Gesamtprogrammes haben. Um Python-Objekte zwischen Rechnern auszutauschen, müssen diese serialisiert werden, was mittels dem Python-internen Pickle/cPickle-Modul erreicht werden kann. Hierzu verglichen Dalcín *et al.* die Pickle/cPickle-Methoden mit einer in C implementierten Buffer-Variante [Dal+11]. Pickle/cPickle war dabei bis zu 30% langsamer als die in C implementierten Buffer-Variante.

**Anwendungen** Aufgrund der mannigfaltigen Möglichkeiten der Optimierung und der einfachen Nutzung, hält Python verstärkt Einzug auf Hochleistungsrechner. Klemm *et al.* präsentierten hierzu 2014, wie Python-Code effizient auf der Intel®Xeon Phi™ Coprozessoren ausgeführt werden kann [KE14]. Wie Python für Hochenergiephysik verwendet werden kann, zeigten Sehrish *et al.* [Seh+17]. Hierbei wurden die Bibliotheken numpy, HDF5 und mpi4py intensiv genutzt. Das von Hand *et al.* vorgestellte nbodykit ist eine Ansammlung von Funktionen für Kosmologie-Simulationen, welche ebenfalls in Python entwickelt wurden und für den Gebrauch auf Hochleistungsrechnern optimiert wurde [HF17]. Wie 2011 von Enkovaara *et al.* gezeigt wurde, kann Python auch auf Hochleistungsrechnern für die Simulation elektronischer Strukturen verwendet werden [Enk+11]. Das Berechnen direkt numerischer Simulationen von Turbulenzverläufen kann laut Mortensen *et al.* ebenfalls performant mit Python durchgeführt werden [ML16].

## 2.2 Einführung

### 2.2.1 Versuchsaufbau

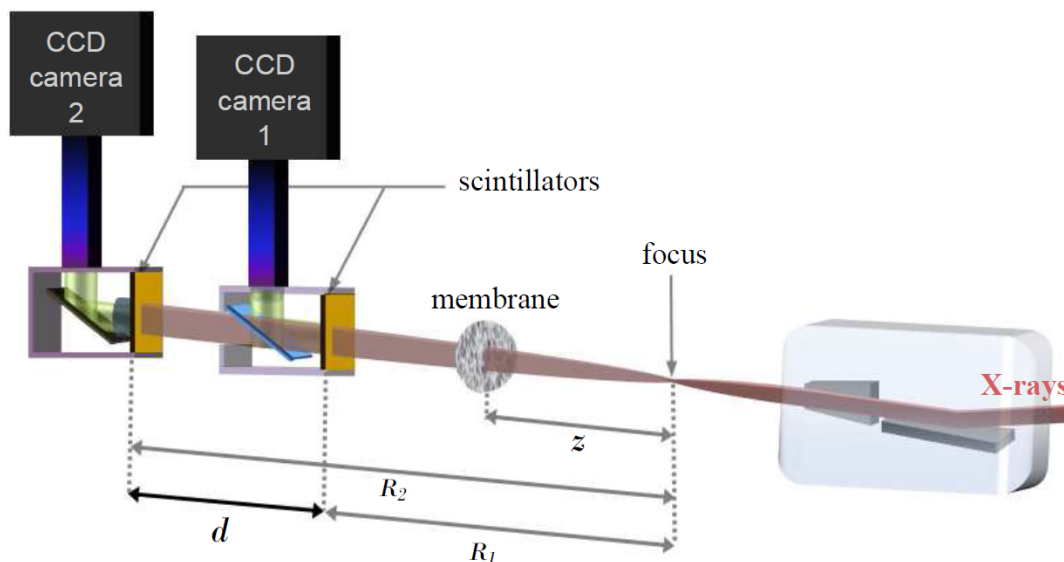


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau ([BZC15], S. 891)

Ein allgemeiner Versuchsaufbau in der Strahlenphysik besteht aus einer Röntgenstrahlenquelle, einem zu untersuchenden Objekt, welches im Fokus der Röntgenstrahlen platziert ist, und einem Aufnahmearrangement, wie es von Bérújon beschrieben wurde ([Bér13], S. 31 ff.). Mittels der Belichtung des zu untersuchenden Objekts können anschließend physikalische Informationen über dieses herausgefunden werden.

Bérújon zeigte ebenfalls, dass die Bestimmung der geometrischen Struktur eines zu untersuchenden Objekts mittels eines solchen Versuchsaufbaus realisiert werden kann ([Bér13], S. 105 ff.). Der Aufnah-

meaufbau, laut Bérújon *et al.*, besteht in diesem konkreten Fall aus einer Fleckenmembran und zwei hochempfindlichen Röntgen-Charge-Coupled Device (CCD)-Sensoren, die zwei Bilder des zu untersuchenden Objekts zeitgleich aus unterschiedlicher Entfernung durch die Fleckenmembran aufnehmen ([BZC15], S. 887). Ein solcher Versuchsaufbau wird in der Abbildung 2.1 dargestellt, welche aus der Veröffentlichung [BZC15] von Bérújon *et al.* entnommen wurde.

Die Röntgenstrahlen werden zuerst am zu untersuchenden Objekt absorbiert und gebrochen und treffen anschließend auf die Membran, wodurch das Röntgenstrahlbündel hinter dieser Membran ein Fleckenmuster aufweist. Dieses Bündel trifft zuerst auf den Szintillator des ersten CCD-Sensors, welcher die Röntgenstrahlen für die CCD-Sensoren sichtbar macht. Der sichtbare Teil dieses Bildes wird zum ersten CCD-Sensor reflektiert und dort aufgenommen. Der Röntgen-Teil wird zum Szintillator des zweiten CCD-Sensors gebrochen, wo dieser in sichtbares Licht gewandelt wird, das mittels einer Optik zum zweiten CCD-Sensor reflektiert und dort aufgenommen wird. ([BZC15], S. 886 ff.)

Aus der Verschiebung der Flecken lässt sich die Phase, und somit die Wellenfront des Lichtes, rekonstruieren, wozu der Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus verwendet wird. Gemäß Bérújon besteht dieser aus zwei Teilen, welche im Folgenden genauer beschrieben werden sollen: einer Kalibrierung der CCD-Sensoren und der Hauptverarbeitungsroutine der Bilder ([Bér13], S. 194). Der Algorithmus soll online (zeitgleich zum Experiment) ausgeführt werden. Die CCD-Sensoren haben eine Auflösung von 2048 mal 2048 Pixeln mit einer Farbtiefe von 16 Bit (Graustufen) und liefern bis zu 10 Bilder pro Sekunde.

### 2.2.2 Kalibrierung der CCD-Sensoren

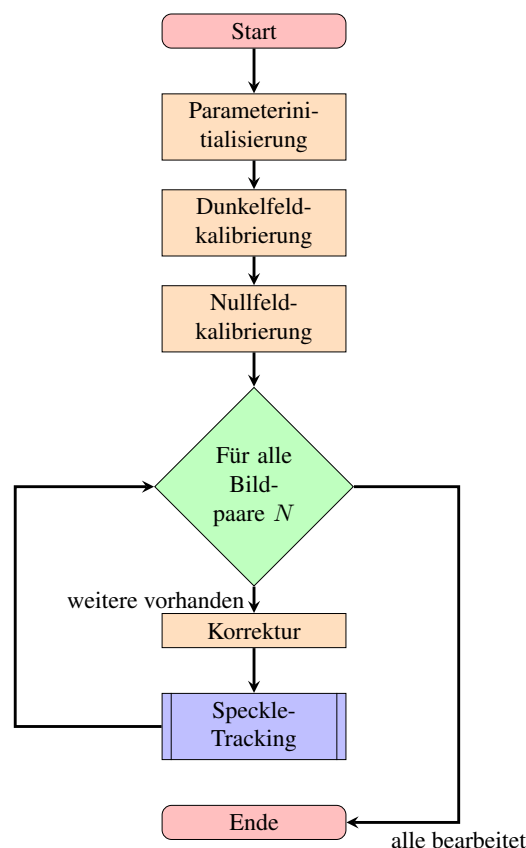


Abbildung 2.2: Programmablaufplan der Kalibrierung (nach ([Bér13], S. 85 ff., S. 194) und [CB17]; angefertigt gemäß DIN 66001 bzw. ISO 5807)

Während der Kalibrierung findet, gemäß Bérújon, zuerst eine Parameterinitialisierung statt, nach wel-

cher der Kamerafehler der CCD-Sensoren in drei Phasen bestimmt wird ([Bér13], S. 76 ff., S. 194). Dazu wird, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, zuerst der Median aus einer festen Anzahl dunkler Bilder aufgenommen, was auch als Dunkelfeldkalibrierung bezeichnet wird. Anschließend findet eine Nullfeldkalibrierung statt, in welcher bei ungestörter Wellenfront der Verstärkungsfaktor der einzelnen Pixel ermittelt wird. Zum Schluss findet eine Erkennung von Streueffekten im Detektor statt. Um letzteres zu erreichen, werden für jeden CCD-Sensor  $N_{Pos}^2$  Bilder unter Bewegung der CCD-Sensoren aufgenommen, wobei  $N_{Pos}$  hier gleich der Anzahl der Verschiebungen in X- und Y-Richtung ist. Dadurch lässt sich aus den vertikalen und horizontalen Gradienten benachbarter Motorpositionen die jeweilige Streuung der Sensoren mittels des Speckle-Trackings bestimmen. Aus diesen  $N_{Pos}$  Positionen ergibt sich somit, dass die Anzahl der Bilder  $N$  gleich  $N_{Pos} \cdot (N_{Pos} - 1) \cdot 2 \cdot 2$  ist, da jeweils horizontal und vertikal  $N_{Pos} \cdot (N_{Pos} - 1)$  Bildpaarkombinationen existieren, welche in beide Richtungen miteinander verrechnet werden müssen. Da die Kalibrierung lediglich am Anfang des Experiments einmal durchgeführt werden muss, wird diese im weiteren Verlauf der Arbeit vernachlässigt.

### Speckle-Tracking

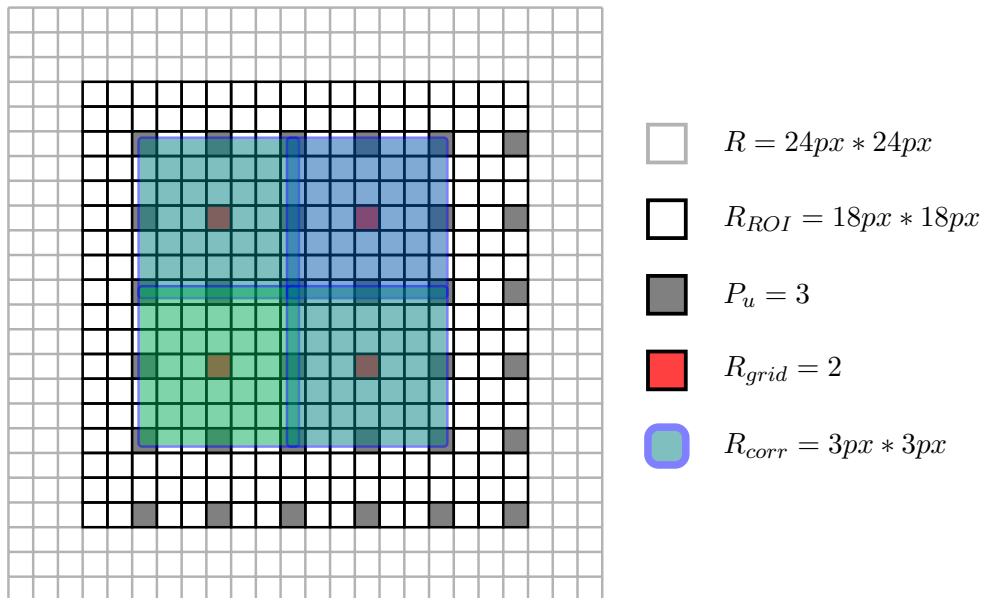


Abbildung 2.3: Übersicht der Template-Matching-Parameter im zweiten Durchlauf

Ziel des Speckle-Trackings ist es, die Flecken (englisch: speckle) zwischen den CCD-Sensoren zu verfolgen, welche von der Fleckenmembran geworfen werden. Der von Bérújon beschriebene Speckle-Tracking-Algorithmus (dargestellt in Abbildung 2.4a) ermittelt zuerst die starre Verschiebung der beiden Sensoren zueinander ([Bér13], S. 76 ff., S. 194). Dies kann mittels festgelegter Werte, Korrelation oder Kreuzkorrelation geschehen. Anschließend werden die Bilder der Sensoren in 35 mal 35 Pixel bzw. 10 mal 10 Pixel große Teilbilder aufgeteilt, damit ein grober Gradient in einem ersten Durchlauf (gezeigt in Abbildung 2.4b) bestimmt werden kann. Diese Teilbilder liegen hierbei alle in der Region of Interest (Region von Interesse) (ROI), welche die möglicherweise fehlerbehafteten Bildränder abschneidet. Die Verschiebung der Teilbilder zwischen den beiden Bildern der Sensoren wird mithilfe des von Lewis beschriebenen Template-Matching-Prozesses ermittelt [Lew94]. Dieser sucht die Teilbilder des ersten Sensors mit denen des zweiten Sensors, wobei eine Übereinstimmungsmatrix entsteht. Anhand der Positionen der Maxima kann nun die Verschiebung abgelesen werden. Dieser Prozess kann laut Lewis durch die Kreuzkorrelation der beiden Teilbilder im Frequenzraum realisiert werden um die Komplexität des Algorithmus zu senken [Lew94]. Damit endet der erste Durchlauf. Im weiteren Verlauf werden zuerst

stark abweichende Werte herausgefiltert und anschließend werden Ebenen an die horizontalen und vertikalen Verschiebungsmatrizen angelegt. Diese sind zur Interpolation nötig, da die Verschiebungsmatrizen lediglich einen Pixel pro Teilbild beinhalten. Sobald die Ebene auf die volle Auflösung des Bildes interpoliert wurde, wird der zweite Durchlauf (gezeigt in Abbildung 2.4c) durchgeführt. Im diesem Durchlauf werden wieder beide Bilder in Teilbilder unterteilt, diesmal können sich die Teilbilder jedoch überlappen. Die konkrete Anzahl der Teilbilder hängt, gemäß des von Cojocar *et al.* entwickelten Codes, von drei Variablen ab [CB17]: der Unterabtastperiode  $P_u$ , der Korrelationsgröße  $R_{corr}$  und der Gitterauflösung  $R_{grid}$ . Mittels der Unterabtastperiode lassen sich, wie in Abbildung 2.3 veranschaulicht, jeweils  $P_u$  Pixel überspringen, wodurch die effektive Auflösung der Region von Interesse  $R_{ROI}$  des Bildes auf Auflösung  $\lfloor R_{ROI}/P_u \rfloor$  reduziert wird. Die Korrelationsgröße  $R_{corr}$  gibt die Größe der Teilbilder an. Die Gitterauflösung bestimmt die Größe des Resultats, indem jeweils ein Teilbild um jeden  $R_{grid}$ -ten Punkt im bereits durch Unterabtastung verkleinerten Bild genutzt wird. Die Verschiebung der so berechneten Teilbilder wird dann mittels des Template-Matching-Prozesses bestimmt und auf Subpixel-Genauigkeit interpoliert. Teilbilder, die im zweiten Durchlauf nicht korrekt zugeordnet werden konnten, werden gesammelt und unter Verwendung von anderen Korrelationsgrößen erneut verarbeitet. Sollten diese Korrelationen ebenfalls fehlschlagen, werden die Ergebnisse der fehlerhaften Teilbilder interpoliert.

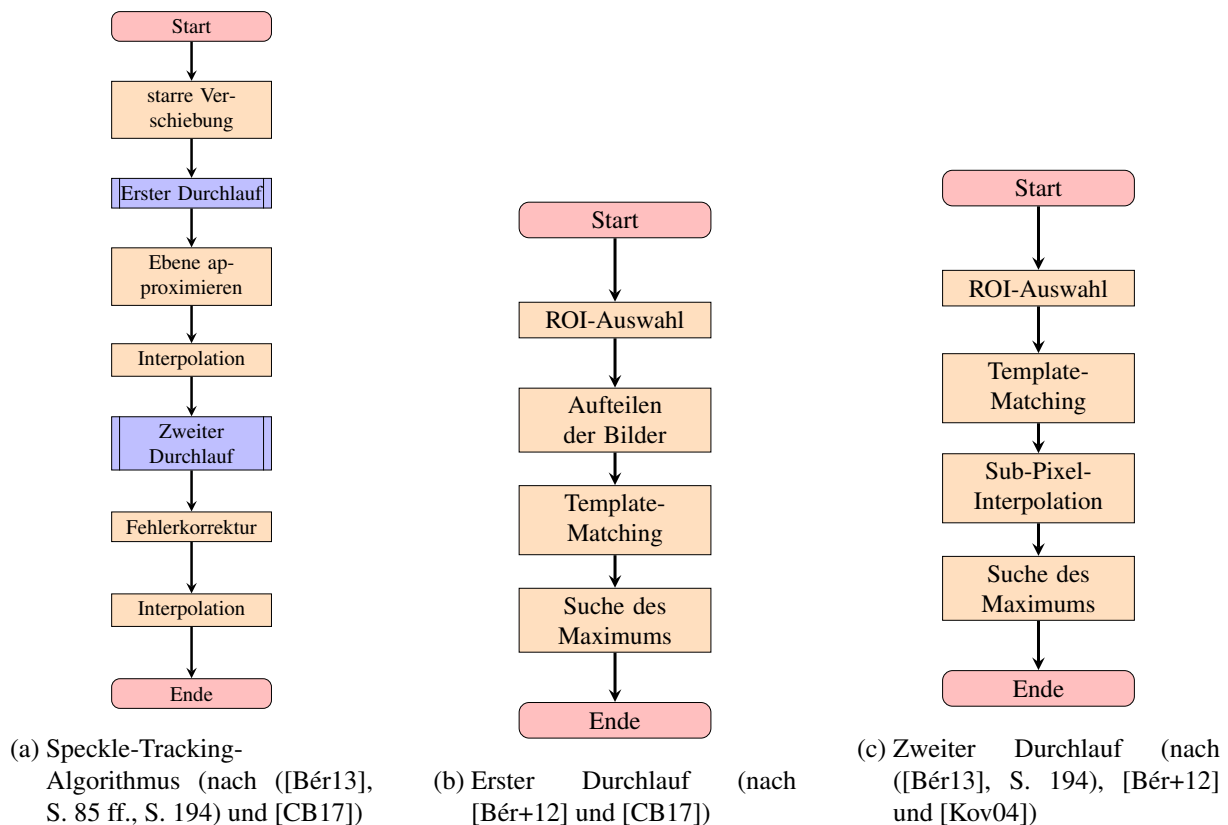


Abbildung 2.4: Programmablaufpläne der Speckle-Tracking-Subroutinen (angefertigt gemäß DIN 66001 bzw. ISO 5807)

### 2.2.3 Verarbeitungsroutine der Bilder

Die von Béruron *et al.* beschriebene Hauptverarbeitungsroutine (siehe Abbildung 2.8a) ähnelt stark der Kalibrierung: Auch hier findet zuerst eine Parameterinitialisierung statt, welche von der Hauptschleife gefolgt wird ([BZC15], S. 891). Diese verarbeitet hier, im Gegensatz zur Kalibrierung, nur jedes Bildpaar (Beispiel: Abbildung 2.5). Innerhalb der Hauptschleife gibt es auch hier die Korrektur der Sensorfehler und das anschließende Speckle-Tracking, dessen Ergebnisse in Abbildung 2.6 gezeigt sind. Die

Korrektur bezieht hierbei die von der Kalibrierung berechneten Ergebnisse, insbesondere die ermittelten Streueffekte der Sensoren. Anders als bei der Kalibrierung werden hierbei jedoch in der Hauptschleife die beiden Gradientenmatrizen mittels des von Frankot *et al.* entwickelten Algorithmus zu einer Phasenmatrix integriert (gezeigt in Abbildung 2.8b), was effizient im Frequenzraum möglich ist [FC88]. Die zu in den Abbildung 2.5 gezeigten Eingabebildern zugehörige Phasenmatrix ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Die in Abbildung 2.5, 2.6 und 2.7 gezeigten Daten sind Teil des *Lenses Set 1*-Datensatzes, welcher am zehnten April 2017 von Thomas Roth, Raymond Barrett, Sébastien Bérubon und Rafael Celeste an der Beamline BM05 der ESRF aufgenommen wurde [Rot+17].

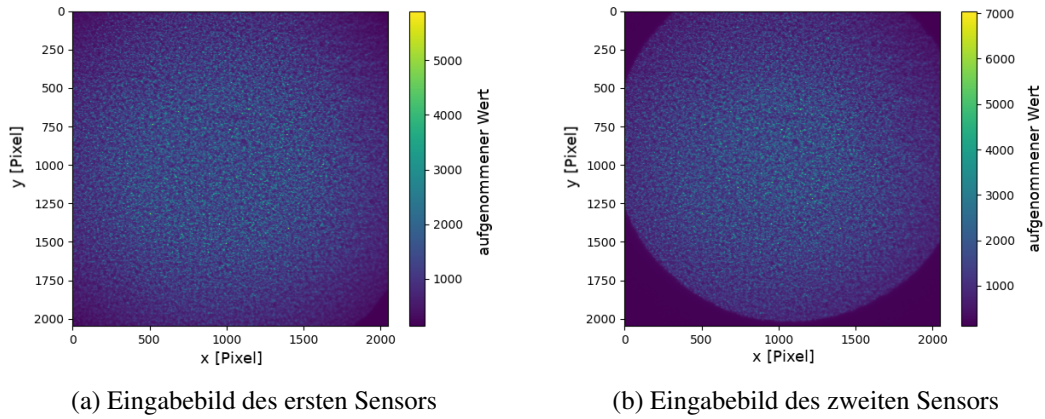


Abbildung 2.5: Eingabebilder (aufgenommen von Roth, Barrett, Bérubon und Celeste an der Beamline BM05 [Rot+17])

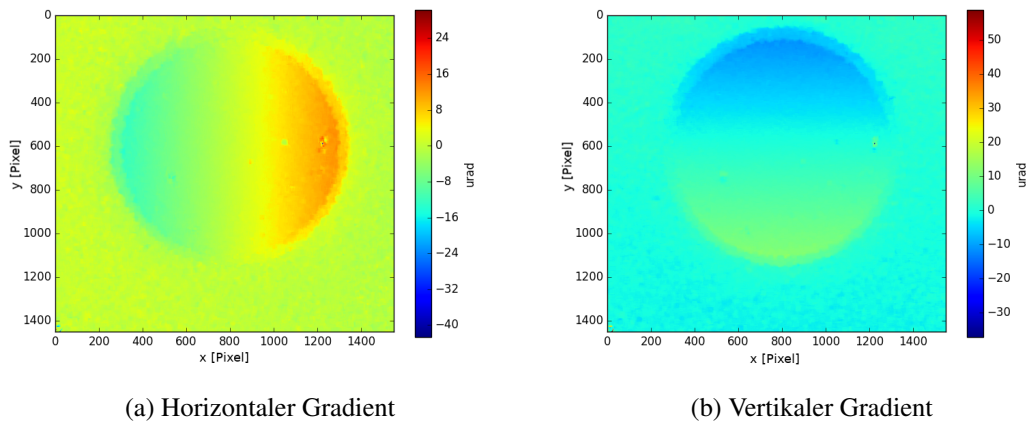
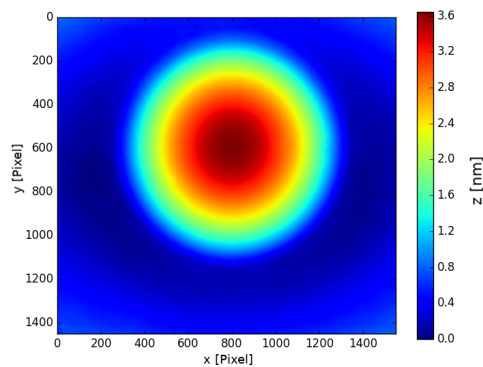


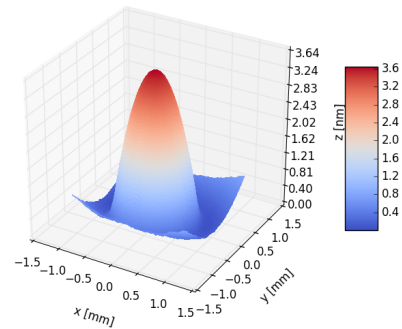
Abbildung 2.6: Gradientenbilder (Ausgabe des Speckle-Tracking, erstellt aus von Roth, Barrett, Bérubon und Celeste an der Beamline BM05 aufgenommenen Daten [Rot+17])

## 2.3 Die vorgegebene Python-Implementierung

Der bestehende Python-Code wurde von Elena-Ruxandra Cojocaru auf Grundlage des von Sébastien Bérubon erstellten MATLAB-Codes entwickelt und ist auf dem GitHub-Repository *Wavefront-Sensor* verfügbar [CB17]. Aufgrund der Abhängigkeit der Bibliothek *EdfFile* zum Auslesen der Bilddaten, wurde der Code in Python 2.7 geschrieben. Der Code ist in vier Dateien aufgeteilt. Die Datei *norm\_xcorr.py* nutzt die Schnittstelle zu der in OpenCV implementierten Template-Matching-Funktion [SA17]. Alle

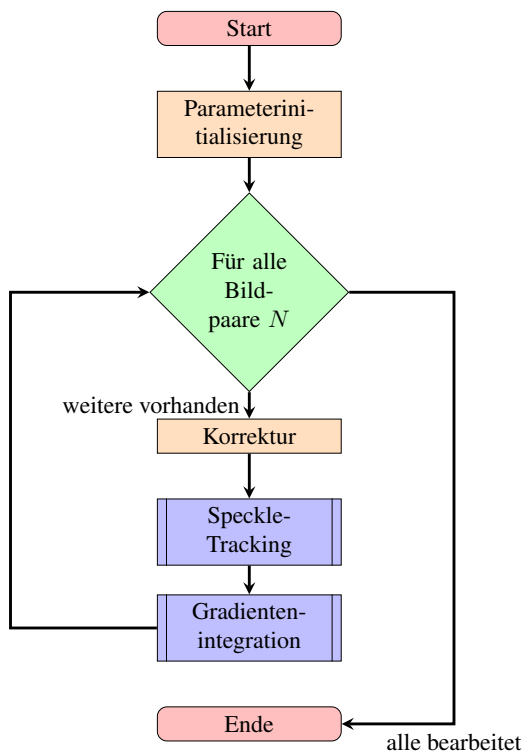


(a) 2D Repräsentation

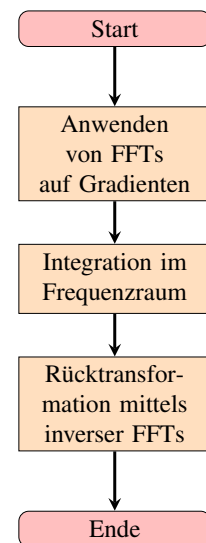


(b) 3D Repräsentation

Abbildung 2.7: Ausgabe des Algorithmus (Phasenmatrix, erstellt aus von Roth, Baret, Bérújon und Celeste an der Beamline BM05 aufgenommenen Daten [Rot+17])



(a) Hauptroutine (nach ([Bér13], S. 194) und [CB17])



(b) Integration der Gradienten gemäß [FC88] und [Kov04]

Abbildung 2.8: Programmablaufpläne der Hauptroutine (angefertigt gemäß DIN 66001 bzw. ISO 5807)

Helferfunktionen, insbesondere die des Speckle-Trackings und die der Integration der Gradienten, befinden sich in der Datei *func.py*. Der Code der Kalibrierung befindet sich in der *detectorDistortion.py* Datei und der der Hauptroutine befindet sich in der Datei *wavefront.py*.

### 2.3.1 Überblick

Die Datei *norm\_xcorr.py* enthält alle Funktionen, die für das Template-Matching benötigt werden. Darunter ist die Funktion `norm_xcorr()`, welche lediglich als Schnittstelle für die Template-Matching



Funktion aus OpenCV dient. Sie nimmt als Argumente ein Template, ein Suchfeld und optional den Namen des gewünschten Algorithmus entgegen und gibt die Übereinstimmungsmatrix, die Position und den Wert des Maximums und des Minimums zurück. Die zweite Funktion in dieser Datei ist die `nxcorr_disp()`-Funktion, welche die Übereinstimmungsmatrix an relevanten Stellen, wo die Übereinstimmung am höchsten ist, auf ein Subpixel-Level verfeinert. Dazu nimmt diese Funktion das Ergebnis der `norm_xcorr()`-Funktion entgegen und gibt die Position sowie den Wert des neuen Maximums und das Signal-Rausch-Verhältnis zurück. [CB17]

Die `func.py` enthält die meisten Helferfunktionen. Dazu gehören unter anderem Funktionen zur ROI-Auswahl und verschiedene Filterfunktionen. Des Weiteren befinden sich in dieser Datei auch die Funktionen `computerCorrField()` und `correction()`. `computerCorrField()` berechnet aus Bildern an einem vorgegebenen Pfad entweder das mediangefilterte Bild für die Dunkelfeld-Kalibrierung oder das durchschnittsgefilterte Bild für Nullfeld-Kalibrierung. Mithilfe der `correction()`-Funktion können nun diese berechneten Korrekturbilder auf Eingabebilder mittels Subtraktion für die Dunkelfeld-Kalibrierung oder mittels Division für die Nullfeld-Kalibrierung angewendet werden. Zwei weitere wichtige Funktionen sind `firstPass()` und `cpCorr()`, welche den ersten (`firstPass()`) und zweiten Durchlauf (`cpCorr()`) implementieren. Diese sind damit Teil des Speckle-Trackings-Algorithmus, welcher in der `crossSpot4()`-Funktion implementiert ist. Die letzte wichtige Funktion im `func.py`-Skript ist die `frankot_chellappa()`-Funktion, welche aus Gradientenfeldern eine dreidimensionale Rekonstruktion berechnet. Dies wird nach dem Speckle-Tracking verwendet. [CB17]

Um dies effizient und schnell zu erreichen, werden die Eingabematrizen mittels Fast Fourier Transformations (FFTs) in den Frequenzraum transformiert, dort nach Formel 21 des von Frankot *et al.* beschriebenen Algorithmus addiert und wieder zurücktransformiert ([FC88], S. 443):

$$\tilde{C}(\omega) = \frac{-j\omega_x \hat{C}_y(\omega) - j\omega_y \hat{C}_x(\omega)}{\omega_x^2 + \omega_y^2}$$

Hierbei ist  $\hat{C}(\omega)$  die rekonstruierte Oberfläche,  $j$  die imaginäre Zahl und  $\hat{C}_x(\omega)$  und  $\hat{C}_y(\omega)$  der vertikale und horizontale Gradient im Frequenzraum.  $\omega_x$  und  $\omega_y$  stellen hierbei die Frequenzen in X- und Y-Richtung dar.

Das letzte Skript, `wavefront.py`, beinhaltet den eigentlichen Rekonstruktionsalgorithmus, welcher sich besonders in der Initialisierungsphase sehr stark dem `detectorDistortion.py`-Skript ähnelt, welches die Kalibrierung der CCD-Sensoren implementiert. Die Hauptroutine wird jetzt, wie in Abbildung 2.8a veranschaulicht, einmal für jedes Bildpaar ausgeführt. Innerhalb dieser Routine wird das entsprechende Bildpaar samt Stellung der Positionierungsmotoren der CCD-Sensoren geladen und mittels der `correction()`-Funktion korrigiert. Da die Pixelgröße zwischen den Sensoren unterschiedlich sein kann, wird hierfür eine Interpolation durchgeführt, die dieses Problem beheben. Bevor das Speckle-Tracking mittels der `crossSpot4()`-Funktion ausgeführt wird, können optional noch ein Gauß-Filter, ein Mittelwertfilter und ein Erosionsfilter angewendet werden. Danach werden die Zwischenergebnisse gespeichert und die endgültige Wellenfront wird mittels der `frankot_chellappa()`-Funktion rekonstruiert und gespeichert. [CB17]

### 2.3.2 Die wichtigsten Funktionen

Die `norm_xcorr()`-Funktion ist die direkte Schnittstelle für die in OpenCV implementierte `matchTemplate()`-Funktion. Hierbei wird eine Matrix aus Übereinstimmungen mittels Faltung erstellt, die für jeden Pixel mit einem Wert zwischen  $-1$  und  $1$  angibt, wie ähnlich sich die Bilder sind. Diese Funktion ist Teil des Speckle-Tracking-Algorithmus, der dafür zuständig ist, die Verschiebung der Wellenfront zwischen den beiden CCD-Sensoren zu ermitteln. Standardmäßig wird hierbei der Kreuzkorrelationskoeffizient verwendet.

Aufgabe der `nxcorr_disp()`-Funktion ist es, den Punkt der maximalen Übereinstimmung auf ein Subpixel-Level zu verfeinern. Dazu wird der Gradient der Pixelwerte in der Nachbarschaft des Maximums gebildet und anschließend interpoliert. Im Gesamtalgorithmus wird dieser Schritt direkt nach dem Template-Matching als Teil des Speckle-Trackings ausgeführt.



Die `frankot_chellappa()`-Funktion nutzt den von Frankot *et al.* vorgeschlagenen Algorithmus um aus vorgegebenen Gradientenfeldern ein dreidimensionales Bild zu rekonstruieren [FC88]. Der hier bereits vorliegende Code basiert auf dem Matlab-Code von Kovsi [Kov04]. Die `frankot_chellappa()`-Funktion wird nach dem Speckle-Tracking aufgerufen und nutzt die durch das Tracking ermittelten Gradientenmatrizen, um die Wellenfront dreidimensional zu rekonstruieren.



## 3 Performance-Analyse der vorgegebenen Python-Implementierung

### 3.1 Komplexitätsanalyse

#### 3.1.1 Speckle-Tracking

Der erste Schritt des Speckle-Trackings ist, laut Bérújon; Cojocarú *et al.*, die Feststellung der starren Verschiebung [Bér13; CB17]. Werden hierfür feste Werte für diese angenommen, ist diese Komplexität konstant. Wird allerdings ein Korrelationsverfahren verwendet, so ist die Komplexität für die Auflösung  $R$  gleich  $\mathcal{O}(R \cdot \log(R))$ , da hierfür FFTs eingesetzt werden können.

Der nächste Verarbeitungsschritt ist der erste Durchlauf. Laut des Codes von Cojocarú *et al.* werden hier die Eingabebilder zunächst durch die Selektion der ROI auf die Auflösung der Region von Interesse  $R_{ROI}$  zugeschnitten und anschließend in quadratische Blöcke mit konstanter Auflösung der Blöcke  $R_{Block}$  aufgeteilt [CB17]. Daraufhin werden die Blöcke aus den Bildern des ersten Sensors in den Gegenstücken des zweiten Sensors mittels des Template-Matchings gesucht. Liegt ein Block teilweise außerhalb der ROI, so wird dieser, gemäß Cojocarú *et al.*, hineinkorrigiert [CB17]. Der Durchlauf hat deshalb Komplexität:

$$\mathcal{O}\left(\frac{R_{ROI} \cdot R_{Block} \cdot \log(R_{Block})}{R_{Block}}\right) = \mathcal{O}(R_{ROI} \cdot \log(R_{Block}))$$

Da die  $R_{Block}$  konstant und die Dauer der einzelnen Suchvorgänge somit ebenfalls als konstant angenommen werden können, liegt dieser Durchlauf in der linearen Komplexitätsklasse. Die anschließende Interpolation wird auf alle Pixel des Bildes angewandt und hat demzufolge eine Komplexität von  $\mathcal{O}(R_{ROI})$ . Im darauf folgenden zweiten Durchlauf werden Subbilder, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, generiert. Durch die Unterabtastperiode  $P_u$  wird  $R_{ROI}$ , und damit auch die Komplexität dieses Teils, mit dem Faktor  $P_u^2$  verringert. Die Korrelationsgröße  $R_{corr}$  nimmt auf das Template-Matching Einfluss, dessen Komplexität dadurch bei  $\mathcal{O}(R_{corr} \cdot \log(R_{corr}))$  liegt. Der Einfluss der Gitterauflösung  $R_{grid}$  ist, ähnlich zu  $P_u$ , eine Verringerung mit dem Faktor  $R_{grid}^2$ . Die Gesamtkomplexität der Template-Matchings im zweiten Durchlauf liegt somit bei:

$$\mathcal{O}\left(\frac{R_{ROI} \cdot R_{corr} \cdot \log(R_{corr})}{P_u^2 \cdot R_{grid}^2}\right)$$

Für die auf den Template-Matching-Prozess folgende Subpixel-Interpolierung werden, wie im Code von Cojocarú *et al.* implementiert, neun Pixel in der Umgebung des Maximums jeder Übereinstimmungsmatrix interpoliert [CB17], womit dieser Schritt folgende Komplexität aufweist:

$$\mathcal{O}\left(\frac{R_{ROI}}{P_u^2 \cdot R_{grid}^2}\right)$$

Am Ende des Speckle-Tracking-Algorithmus wird versucht, nicht zuordenbare Ergebnisse mit einer anderen Korrelationsgröße  $R_{corr}'$  erneut zuzuordnen. Im schlimmsten Fall wird der zweite Durchlauf für die Hälfte der Subbilder  $N_{corr}$ -fach wiederholt, wobei  $N_{corr}$  die Anzahl der Korrekturversuche  $N_{corr}$  repräsentiert. Bei höheren Fehlerraten über 50% bricht das von Cojocarú *et al.* entwickelte Programm ab [CB17]. In der hier als Grundlage vorliegenden Implementierung ist  $N_{corr}$  gleich 6. Die Gesamtkomplexität des Speckle-Tracking-Algorithmus liegt damit in der Komplexitätsklasse:

$$\mathcal{O}\left(\frac{R_{ROI} \cdot R_{corr} \cdot \log(R_{corr}) \cdot N_{corr}}{P_u^2 \cdot R_{grid}^2}\right)$$

### 3.1.2 Integration der Gradienten

Um eine effiziente Integration der Gradienten zu ermöglichen, beruht der von Frankot *et al.* vorgeschlagene Algorithmus auf der Integration im Frequenzraum [FC88]. Hierzu werden zuerst die Gradientenbilder mittels FFTs in diesen Raum transformiert, dort in linearer Komplexität integriert und zum Schluss wieder zurücktransformiert. Aufgrund der Verwendung von FFTs befindet sich dieser Algorithmus in der Komplexitätsklasse:

$$\mathcal{O}(R \cdot \log(R))$$

### 3.1.3 Verarbeitungsroutine der Bilder

Die Hauptroutine beginnt, gemäß [CB17], mit einer trivialen Parameterinitialisierung, die als linear angenommen werden kann. Auf diese folgt die Hauptschleife, welche für die Anzahl der Bildpaare  $N_{Paare}$  jeweils einmal ausgeführt wird [CB17]. Hierzu werden zuerst die Sensorbilder mittels der bei der Kalibrierung ermittelten Werte mit einer Komplexität von  $\mathcal{O}(R)$  korrigiert. Dem folgt, wie von Cojocar *et al.* implementiert, der Speckle-Tracking-Algorithmus und die Integration der Gradienten [CB17]. Die höchste Komplexität hat hier der Template-Matching-Algorithmus, welcher damit die Komplexitätsklasse der Hauptroutine festlegt auf:

$$\mathcal{O}\left(\frac{N_{Paare} \cdot R_{ROI} \cdot R_{corr} \cdot \log(R_{corr}) \cdot N_{corr}}{P_u^2 \cdot R_{grid}^2}\right)$$

Diese Komplexitätsklasse liegt insbesondere für kleine  $N_{corr}$ ,  $P_u$  und  $R_{grid}$  in der Oberklasse:

$$\mathcal{O}(N_{Paare} \cdot R_{ROI} \cdot R_{corr} \cdot \log(R_{corr}))$$

## 3.2 Performance-Messungen

**Testsystem** Alle Benchmarks liefen auf der *haswell*-Partition des Taurus-Supercomputers an der Technischen Universität Dresden. Jeder Knoten dieser Partition ist ausgestattet mit zwei Intel®Xeon® E5-2680 v3 CPUs. Diese haben jeweils zwölf Rechenkerne, die mit bis zu 2.50 Gigahertz (GHz) getaktet sind. HyperThreading war hierbei nicht aktiviert. Die Knoten haben 64 Gibibyte (GiB) (*haswell64*), 128 GiB (*haswell128*) oder 256 GiB (*haswell256*) Arbeitsspeicher zur Verfügung [Mar17]. Zusätzlich ist pro Rechenknoten eine 128 Gigabyte (GB) Solid-State Drive (SSD) installiert. Es wurde unter anderem Python 2.7.11 mit numpy 1.10.1 und OpenCV 3.1.0 verwendet. Eine komplette Liste aller geladenen Module lässt sich auf dem GitHub-Repository dieses Projektes finden [Sch18b].

**Konfigurationen** Jede Konfiguration, bestehend aus Datensatz und Kernanzahl, wurde nach vier Aufwärmiterationen fünfmal ausgeführt. Hierbei wurden jeweils die reinen Ausführungszeiten des gesamten Skripts und einzelner Funktionen erfasst. Aus allen vorliegenden Zeiten wurden Input/Output (I/O)-Zeiten herausgerechnet. Die Laufzeit mit den entsprechenden Datensätzen wurde auf unterschiedlich vielen Kernen von eins bis 24 gemessen. Jeder Benchmark lief exklusiv auf einem Knoten.

Zur Leistungsfeststellung der vorliegenden Implementierung werden zwei verschiedene Arten von Datensätzen verwendet: *Experiment 6* und *Lenses*. Die *Experiment 6*-Datensätze wurden hierbei von Roxandra Cojocar, Sébastien Béruton und Eric Ziegler am 24. September und die *Lenses*-Datensätze wurden von Thomas Roth, Raymond Barrett, Sébastien Béruton und Rafael Celeste am zehnten April 2017 an der Beamline BM05 der ESRF aufgenommen [CBZ17; Rot+17]. Die Bildpaare des *Experiment 6*-Datensatzes wurden, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, mit zwei Sensoren gleichzeitig aufgezeichnet, währenddessen die Bildpaare des *Lenses*-Datensatzes aus Bildern ein und desselben Sensors stammen, wobei anfangs ein Bild als Referenz aufgenommen wurde. Die Eigenschaften dieser Typen werden in Tabelle 3.1 gegenüber gestellt. Die einzelnen Datensätze mit deren Anzahl der Bilder sind in Tabelle 3.2 zu finden.

	Experiment 6	Lenses
$R_{ROI}$	Sensor 1: $550px * 550px$ Sensor 2: $1450px * 1450px$	$1450px * 1550px$
$R_{grid}$	1	1
$R_{corr}$	$91px * 91px$	$41px * 41px$
$P_u$	1	1
Pixelgröße	unterschiedlich	gleich

Tabelle 3.1: Parameter der Datensatztypen gemäß Cojocaru *et al.* [CB17]

	Experiment 6			Lenses			
	Lenses 200	Lenses 500	Lenses 1500	Set 1	Set2	Set 3	
$N_{Paare}$	21	11	14	10	5	1	2

Tabelle 3.2: Anzahl der Bildpaare der Datensätze gemäß Cojocaru *et al.* [CB17]

**Laufzeiten** Die Laufzeiten der Konfigurationen, dargestellt in Abbildung 3.1, variieren untereinander stark und reichen von ca. dreieinhalb Stunden für den *Lenses Set 1*-Datensatz auf einem Kern bis hin zu ca. vier Minuten für den *Lenses Set 3* Datensatz mit einem Bild auf 24 Kernen. Die Messpunkte sind hierbei dick hervorgehoben und die Skala ist logarithmisch eingeteilt.

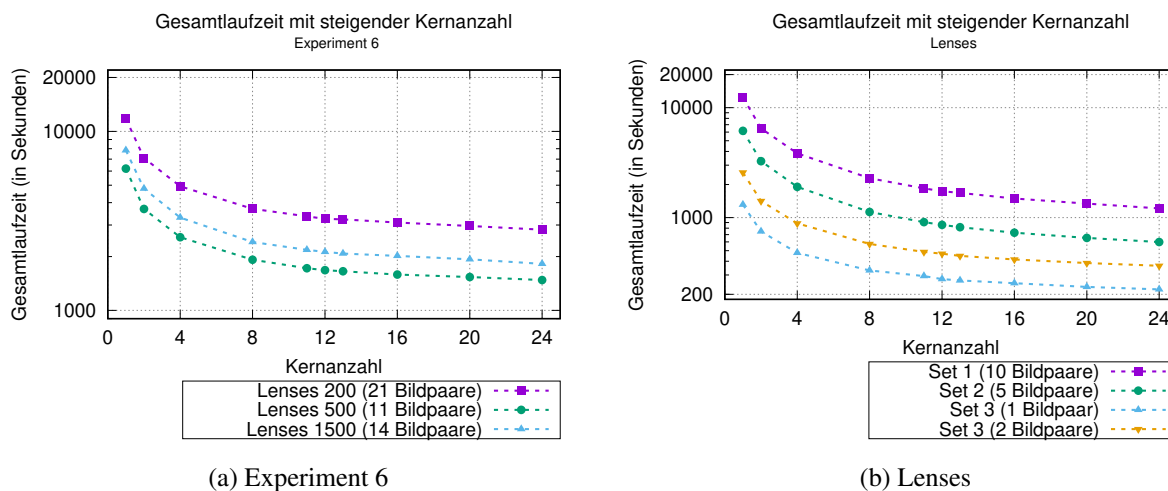


Abbildung 3.1: Gesamtlaufzeiten

Der Speed-Up des Programmes skaliert mit der Anzahl der Prozessorkerne nicht linear und flacht schnell ab. Der Speed-Up-Faktor für die *Experiment 6*-Datensätze konvergiert gegen vier. Bei den *Lenses*-Datensätzen hingegen wird bei 24 Kernen ein Speed-Up von mehr als zehn erreicht. In den auf Abbildung 3.2 visualisierten Graphen ist eine starke Skalierung deutlich erkennbar.

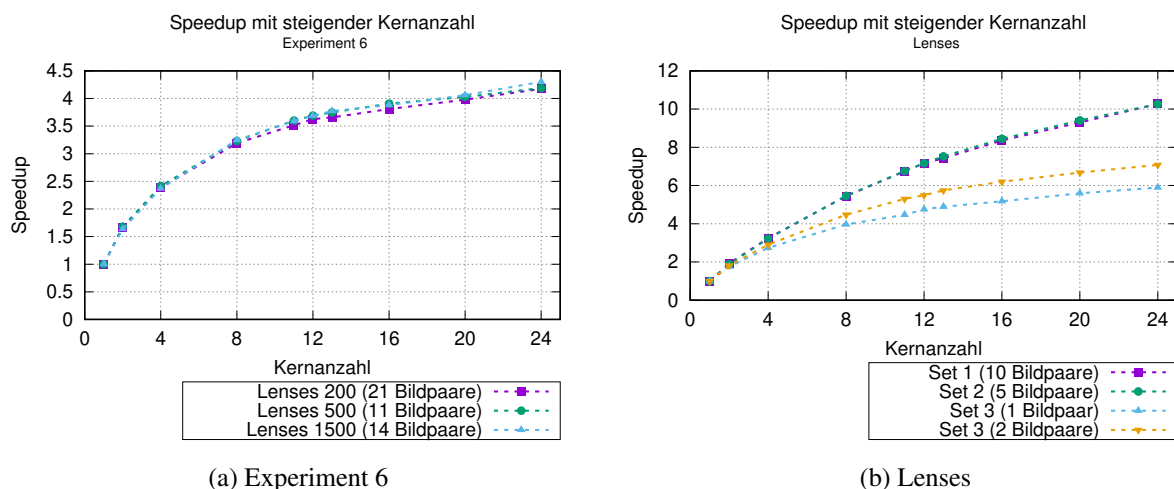


Abbildung 3.2: Speed-Up

Um Engpässe und besonders rechenaufwendige Funktionen zu identifizieren, wurde das Programm mit Zeitmessern versehen, die Ausführungszeiten und Aufrufanzahl protokolliert haben. Anschließend wurde es auf einem Rechenkern unter denselben Bedingungen, wie die anderen Konfigurationen, ausgeführt und die Zeiten wurden gemessen. Ein Überblick über das Gesamtprogramm mit seinen Subroutinen und deren Anteil an der Gesamtlaufzeit ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

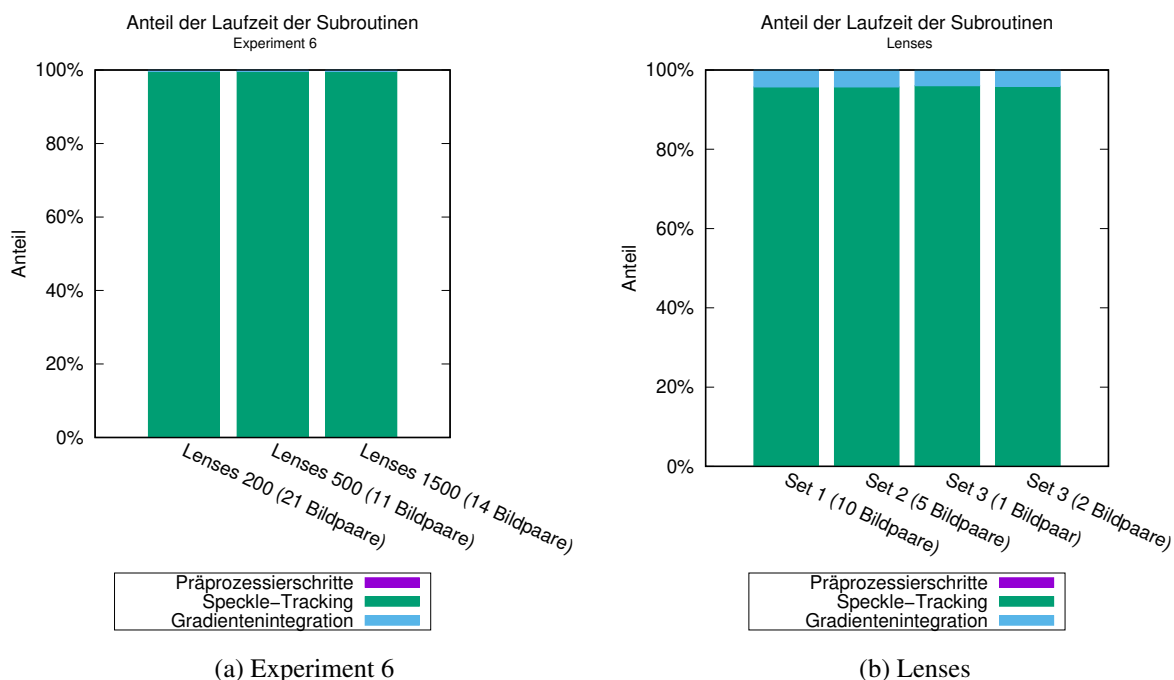


Abbildung 3.3: Anteile der Laufzeiten

Hierbei ist eindeutig zu sehen, dass die meiste Zeit für das Speckle-Tracking benötigt wird. Um weitere Informationen über die Laufzeiten der einzelnen Speckle-Tracking-Schritte zu gewinnen, wurde dieses ebenfalls mit Zeitmessern versehen. Die zeitliche Aufteilung dieser Schritte zeigt Abbildung 3.4, dass hierbei der zweite Durchlauf am meisten Zeit benötigt.

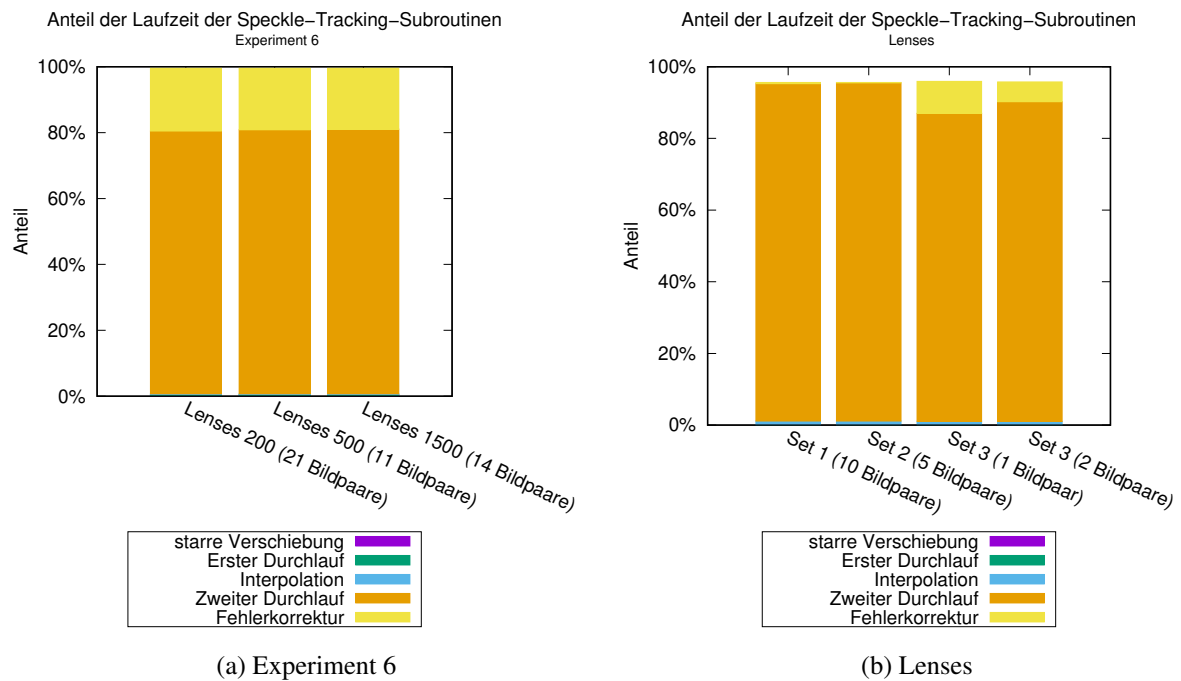


Abbildung 3.4: Anteile der Laufzeiten des Speckle-Tracking-Algorithmus

Die kumulative Zeit der fünf rechenaufwendigsten Funktionen aller Konfigurationen, dargestellt in Abbildung 3.5, liegt jeweils bei über 95% der Gesamtzeit.

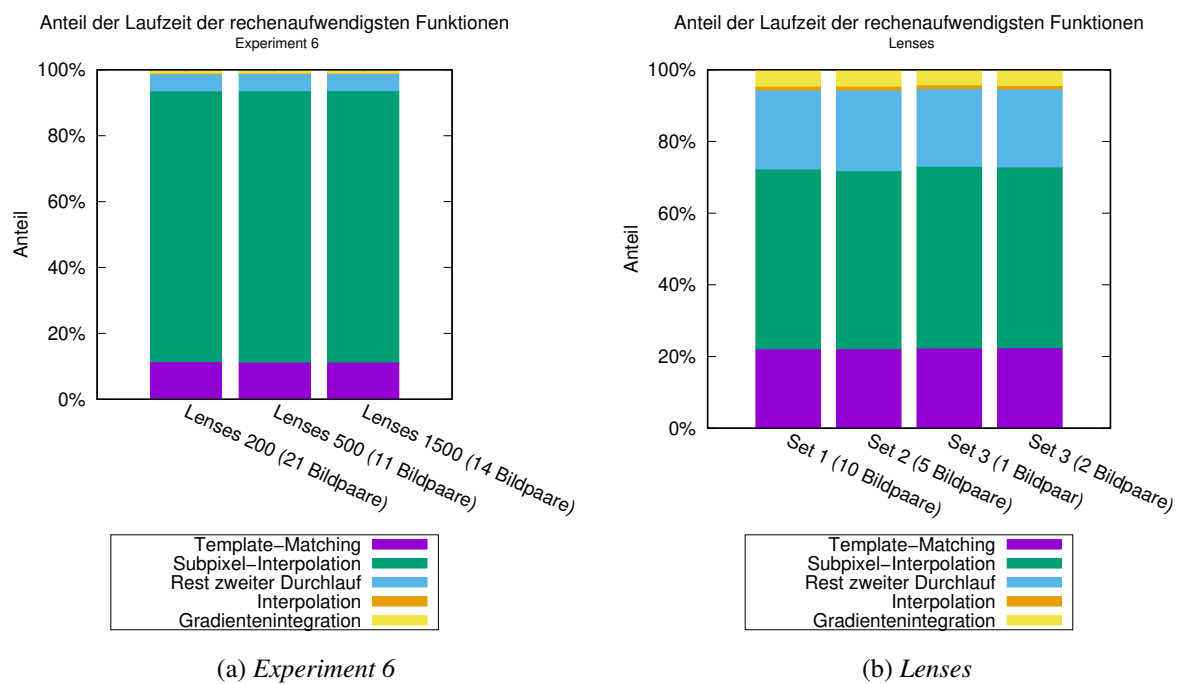


Abbildung 3.5: Anteile der Laufzeiten der langsamsten Funktionen

### 3.3 Performance-Engpässe

Der Grund der langen Rechenzeiten des Template-Matchings und der Subpixel-Interpolation liegt in der hohen Anzahl der Aufrufe dieser begründet. Der zweite Durchlauf allein wird im *Experiment 6 Lenses 200*-Datensatz über 5.3 Millionen mal aufgerufen. In jedem dieser Aufrufe wird das Template-Matching und die Subpixel-Interpolation jeweils einmal genutzt. Hinzu kommt, dass, bis auf das Template-Matching, der zweite Durchlauf nur geringen Gebrauch von bereits optimierten Bibliotheken wie numpy macht und somit der Python-Overhead starken Einfluss auf die Laufzeiten hat. Innerhalb des Speckle-Trackings ist der Aufruf des zweiten Durchlaufes mittels der joblib parallelisiert. Diese nutzt standardmäßig die multiprocessing-Bibliothek, welche für jeden Thread einen Fork der gesamten Python-Umgebung erstellen muss [Gri+18]. Die hohe Rechenzeit der Gradienten-Integration ist im Aufruf dieser auf die Größe des Gesamtbildes begründet. Insgesamt hat das Programm eine schlechte CPU-Auslastung von lediglich durchschnittlich 19,635% [Sch18a], wodurch häufig einige Kerne nicht oder nur wenig genutzt werden.

### 3.4 Prüfen der Ergebnisse

Um die Korrektheit der Ergebnisse nach der Optimierung sicherstellen zu können, wurden die Ergebnisse der Referenzimplementierung unter Eingabe aller Datensätze gespeichert. Diese werden als Referenz für einen bitweisen Abgleich verwendet. Auf Fließkommazahlen basierende Ungenauigkeiten werden hierbei bereits als Fehler gewertet. Nach den initialen Benchmarks wurde diese Methode zur Sicherstellung der Datenintegrität eingesetzt und für geeignet befunden.



## 4 Parallelisierung der kritischen Abschnitte

Um einer optimalen Leistung nahezukommen, wurde bei der Implementierung ein iterativer Ansatz gewählt. Hierzu wurden zuerst die Möglichkeiten der Parallelisierung und anschließend die der Optimierung in Python betrachtet und aufeinander aufbauend implementiert.

### 4.1 Parallelisierung

#### 4.1.1 Parallelisierung der Verarbeitung einzelner Bildpaare mittels MPI

Da die zu bearbeitenden Bildpaare voneinander unabhängig sind, lassen sich diese trivial parallelisieren. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt besonders in seiner simplen Implementierung und erwarteten linearen Skalierung begründet. Dieser Ansatz bringt allerdings auch Nachteile mit sich: Einige Message Passing Interface (MPI)-Implementierungen erlauben das Erstellen neuer Threads nur, wenn dies beim Installieren der Bibliotheken angegeben wird [Pro17] und es ist nur eine schwache Skalierung zu erwarten. Sofern kein Multithreading innerhalb von MPI möglich ist, limitiert die Anzahl der Bildpaare die Parallelisierungsmöglichkeit stark. In der auf dem GitHub-Branch *mpi* verfügbaren Implementierung dieses Ansatzes wird pro Bildpaar primär ein Kern genutzt [CBS18]. Die Initialisierung wird dabei vom Masterprozess übernommen, dessen Aufgabe es auch ist, die Bildpaare auf weitere Kerne zu verteilen. Zum Schluss werden die Ergebnisse wieder beim Masterprozess gesammelt und gespeichert.

Die parallele Bearbeitung eines Bildpaares wird, wie bereits zuvor, von der *joblib*-Bibliothek übernommen, welche die Nutzung von Multithreading in Python ermöglicht. Hierbei wurde nicht sichergestellt, dass unter Verwendung mehrerer Rechenknoten die Bildpaare gleichmäßig auf diese verteilt wurden.

#### 4.1.2 Parallelisierung innerhalb der Verarbeitung einzelner Bildpaare mittels MPI

Eine sinnvolle Erweiterung zur oben beschriebenen Methode ist das Ersetzen der genutzten Multithreading-Bibliothek mittels MPI, sodass selbst die Berechnung eines einzelnen Bildpaares über Rechengrenzen hinweg möglich ist. In diesem Zuge wurde auch die Fehlerkorrektur am Ende des Speckle-Trackings parallelisiert, indem die zu korrigierenden Bildausschnitte auf mehrere Kerne verteilt wurden. Zusätzlich erleichtert diese Implementierung den Einsatz eines Tracing-Programmes, wie SCORE-P [Knü+12]. Dies war aufgrund der unterliegenden multiprocessing-Bibliothek zuvor nicht trivial möglich. Ein hoher Speed-Up wird insbesondere für wenige zu korrigierende Bildausschnitte nicht erwartet.

Im Konkreten werden die Bildpaare auf CPU-Kern-Gruppen verteilt, welche durch gleichmäßiges Aufteilen der verfügbaren CPU-Kerne erstellt werden. Einer dieser Kerne innerhalb der Gruppe agiert hierbei als Hauptkern und ist dafür verantwortlich, das Bildpaar zu verarbeiten, wobei dieser Aufgaben mittels eines MPI-Kommunikators an die anderen Rechenkerne der Gruppe verteilen kann. Die Aufgabe des Masterprozesses ist es, die Bildpaare gleichmäßig auf die Gruppen zu verteilen. Dies ist beispielhaft in der Abbildung 4.1 gezeigt. Sollten mehr Bildpaare als Rechenkerne vorhanden sein, werden mehrere Bildpaare von einem Kern hintereinander verarbeitet.

Die Programmierschnittstelle wurde so entworfen, dass die Verteilung der Bildpaare auf die Kerne und das Parallelisieren innerhalb dieser für den Programmierer transparent geschieht. Hierbei gibt der Nutzer lediglich drei Funktionszeiger an: einen für die Initialisierungsfunktion, einen für die Hauptverarbeitungsroutine und einen für die Endfunktion. Die Initialisierungsfunktion generiert hierbei zwei Listen: eine mit globalen Parametern, die später an alle Hauptkerne gesendet wird, und eine mit lokalen Parametern, die auf die einzelnen CPU-Kern-Gruppen verteilt werden. Die so verteilten Daten werden der

Hauptverarbeitungsroutine übergeben, welche die Daten parallel verarbeitet und das Ergebnis zurückgibt. Dieses wird anschließend auf dem Masterprozess gesammelt und der Endfunktion übergeben. Innerhalb der Hauptverarbeitungsroutine bietet eine Schnittstelle auf die CPU-Kern-Gruppe eine weitere Parallelisierungsmöglichkeit. Diese Schnittstelle wurde hierbei ähnlich zur joblib-Implementierung entworfen. Auch hier werden wieder ein Funktionszeiger und lokale sowie globale Parameter entgegengenommen, die analog zu der oben beschriebenen Methode in der Gruppe verteilt werden. Eine exemplarische Implementierung eines Programmes, welches jedes Element in einer Matrix mit einem bestimmten Wert multiplizieren und anschließend einen weiteren aufaddieren soll, ist in Listing 4.1 gezeigt. Ein mittels der joblib implementiertes, funktional äquivalentes Programm ist in Listing 4.2 dargestellt. Die äquivalente Ausgabe der beiden Programme ist in Listing 4.3 dokumentiert. Die Implementierung dieses Ansatzes ist auf dem GitHub-Branch *mpi-advanced* zu finden [CBS18].

Listing 4.1: Parallelisierung mittels der in MPI implementierten Version

---

```

1 from distributor import Distributor
2 def initFn():
3     global_args = (1, 2)
4     local_args = [[1, 5], [2, 6], [3, 7], [4, 8]]
5     return (global_args, local_args)
6 def addFn(global_args, local_args):
7     (multiply, add) = global_args
8     return local_args * multiply + add
9 def mainFn(global_args, local_args, dist):
10    return dist.parallel(addFn, global_args, local_args)
11 def exitFn(global_args, result):
12    print("The_result_is", result)
13    return 0
14 dist = Distributor(initFn, mainFn, exitFn)

```

---

Listing 4.2: Parallelisierung mittels der joblib-Bibliothek

---

```

1 from joblib import Parallel, delayed
2 import multiprocessing
3 def addFn(array, multiply, add):
4     result = []
5     for element in array:
6         result += [element * multiply + add]
7     return result
8 matrix = [[1, 5], [2, 6], [3, 7], [4, 8]]
9 multiply = 1
10 add = 2
11 n_jobs = len(matrix)
12 result = Parallel()(delayed(addFn)(matrix[k], multiply, add) for k in range(
13     n_jobs))
14 print("The_result_is", result)

```

---

Listing 4.3: Ausgabe der Programme

---

```

1 The result is [[3, 7], [4, 8], [5, 9], [6, 10]]

```

---

## 4.2 Optimierung der Performance-Engpässe in Python

Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, werden über 95% der Rechenzeit in den fünf langsamsten Funktionen verbraucht. Unter diesen ist insbesondere die `nxcorr_disp()`-Funktion, welche komplett in Python implementiert ist. Um die Leistung solcher Funktionen zu verbessern, werden im Folgenden Methoden zur Optimierung des bestehenden Codes betrachtet – mit besonderem Augenmerk auf der Beschleunigung der langsamsten Funktionen.

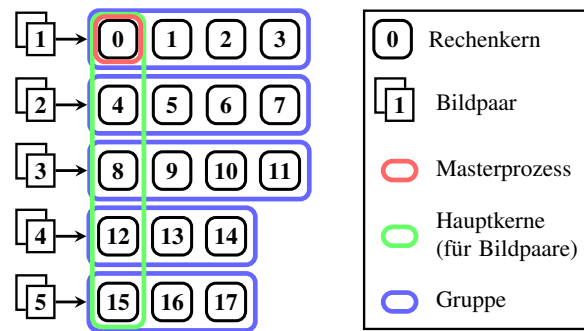


Abbildung 4.1: Verteilung von fünf Bildpaaren auf 18 Rechenknoten

### 4.2.1 Nutzen bereits optimierter Funktionen

Einige Teile des Codes können durch bereits in Python oder einer optimierten Bibliothek enthaltenen Funktion ersetzt werden, womit der Interpretieraufwand erheblich reduziert wird. Dies gehört damit zu einer der grundlegenden Optimierungsmöglichkeiten. Zusätzlich dazu enthalten diese Funktionen bereits Plattform-spezifische Optimierungen. In der Funktion `nxcorr_disp()` lassen sich Code-Abschnitte mit diesem Verbesserungspotential finden. Das Listing 4.4 zeigt den Codeausschnitt aus dieser Funktion zum Ermitteln eines Maximums einer Matrix in reinem Python-Code, wobei die äußeren Zeilen und Spalten vernachlässigt werden. Listing 4.5 zeigt einen funktional äquivalenten Code unter Nutzung von bereits optimierten Funktionen. `lengthX` und `lengthY` geben hier die Dimensionen der Eingabematrix `nxcorr` an.

Listing 4.4: Finden des Maximums einer Matrix

```

1 for i in range(1, lengthY - 1):
2     for j in range(1, lengthX - 1):
3         if(nxcorr[i, j] > maxValue):
4             maxValue = nxcorr[i, j]
5             maxI = i
6             maxJ = j

```

Listing 4.5: Finden des Maximums einer Matrix mittels NumPy und OpenCV

```

1 nxcorr_small = nxcorr[1:-1, 1:-1]
2 (_, maxValue, _, (maxJ, maxI)) = cv2.minMaxLoc(nxcorr_small)
3 maxI += 1
4 maxJ += 1

```

Des Weiteren befindet sich in der `nxcorr_disp()`-Funktion die Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses (gezeigt im Listing 4.6), was allerdings im weiteren Verlauf des Programmes nicht wieder verwendet wird und deshalb entfernt werden kann.

Listing 4.6: Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses

```

1 avg = 0.0
2 count = 0
3 for i in range(lengthY):
4     for j in range(lengthX):
5         if((i is not maxI) and (j is not maxJ)):
6             avg = avg + abs(nxcorr[i, j])
7             count = count + 1
8 avg = avg / float(count)
9 SNr = maxValue / avg

```

Nach dem Anwenden dieser Änderungen befindet sich keine in Python implementierte Schleife mehr in der Funktion. Angesichts der hohen Aufrufzahl von `nxcorr_disp()` und dem Entfernen großer Codeanteile ist ein hoher Beschleunigungsfaktor zu erwarten.

Zum Schluss wurde die Evaluierung des zu verwendenden Korrelationsalgorithmus in der `norm_xcorr()`-Funktion, gezeigt in Listing 4.7, durch eine direkte Variable (gezeigt in Listing 4.8) ersetzt. Eine Version des Codes mit allen hier vorgeschlagenen Optimierungen ist auf dem Branch `intrinsic`s des GitHub-Repositorys zu finden [CBS18].

Listing 4.7: Evaluierung der Korellationsmethode

---

```

1 def norm_xcorr(template, searchArea, method='cv2.TM_CCORR_NORMED'):
2     meth = eval(method)
3     #...
```

---

Listing 4.8: Übergabe der Korellationsmethode als Variable

---

```

1 def norm_xcorr(template, searchArea, method=cv2.TM_CCORR_NORMED):
2     meth = method
3     #...
```

---

## 4.2.2 Kompilieren

Eine weitere Möglichkeit der Minimierung des Python-Engpasses ist die Übersetzung des Python-Codes in nativen Maschinencode. Die möglichen Ansätze hierbei reichen von der Übersetzung des gesamten Programmes über die Übersetzung einzelner Funktionen, die in Python dann als Modul geladen werden können, bis hin zur Nutzung eines JIT-Compilers, welcher annotierte Funktionen bei dessen ersten Aufruf in nativen Maschinencode übersetzt.

### Gesamtes Programm

Die einfachste Möglichkeit der Übersetzung ist es, das gesamte Programm in Maschinencode zu übersetzen. Hierzu kann die Bibliothek `cython` [Beh+17] genutzt werden, welche Python-Code in C übersetzt, was anschließend in Maschinencode übersetzt werden kann. Hierzu wurde nur die Datei `waveFront.py` unübersetzt gelassen, da diese keine rechenaufwendigen Funktionen enthält und diese nur aus anderen Dateien, insbesondere der `func.py` aufruft. Die benötigten Installationsdateien sind auch dem GitHub-Branch `compiled` verfügbar [CBS18].

### Einzelne Funktionen

**numba** numba ist eine Optimierungsbibliothek für Python, welche unter anderem die Möglichkeit bietet, Funktionen JIT zu übersetzen sowie CUDA<sup>1</sup> und OpenCL<sup>2</sup> zu nutzen [LPS15]. Funktionen können zur JIT-Übersetzung mittels der Annotation `@jit` markiert werden. Sobald während der Ausführung diese Funktion erreicht wird, übersetzt numba den Code in eine Intermediate-Repräsentation, welche anschließend von LLVM weiter in Maschinencode übersetzt wird. Beim nächsten Aufruf wird die annotierte Funktion in einer Liste aller übersetzten Funktionen gesucht und es wird sofort der Maschinencode der Funktion verwendet. Ein permanentes Speichern des Übersetzungsergebnisses ist mittels der Annotation `@jit(cached = True)` möglich. Auf dem numba-Branch befindet sich eine Version des Codes, in dem diese Annotationen genutzt werden [CBS18]. Annotiert wurden hierbei Funktionen zur Auswahl der ROI innerhalb der `cpCorr()`-Funktion und die `nxcorr_disp()`-Funktion.

---

<sup>1</sup><https://developer.nvidia.com/cuda-zone>

<sup>2</sup><https://www.khronos.org/opencl>

**Cython** Eine weitere weitaus mächtigere Methode zur Übersetzung einzelner Funktionen bietet die Cython-Bibliothek, welche bereits genutzt wurde, um das gesamte Programm zu übersetzen. Diese führt die Möglichkeit der Typisierung ein und lässt die direkte Einbindung von C zu. In der auf dem GitHub-Branch *cython* verfügbaren Version wurde Cython genutzt, um die Funktionen `norm_xcorr()` (siehe Listing 4.9) und `nxcorr_disp()` (siehe Listing 4.10) zu übersetzen [CBS18]. Hierbei wurden alle Variablen mit Typen versehen und es wurde die von Cython bereitgestellte Schnittstelle zu NumPy genutzt. Auf dem Branch *compiled-advanced* wurde die Übersetzung des gesamten Programmes mit den hier optimierten Funktionen zusammengeführt [CBS18].

Listing 4.9: Die in Cython optimierte Funktion `norm_xcorr()`


---

```

1 def norm_xcorr(np.ndarray[float, ndim=2] template, np.ndarray[float, ndim=2]
  searchArea, int method = cv2.TM_CCOEFF_NORMED):
2     cdef double minVal = 0.0, maxVal = 0.0
3     cdef tuple minLoc, maxLoc
4     cdef np.ndarray[float, ndim=2] corr = cv2.matchTemplate(searchArea, template
      , method)
5     minVal, maxVal, minLoc, maxLoc = cv2.minMaxLoc(corr)
6     return corr, minVal, maxVal, minLoc, maxLoc

```

---

Listing 4.10: Die in Cython optimierte Funktion `nxcorr_disp()`


---

```

1 def nxcorr_disp(np.ndarray[float, ndim=2] nxcorr):
2     cdef int lengthY = nxcorr.shape[0]
3     cdef int lengthX = nxcorr.shape[1]
4     # find maximum
5     nxcorr_small = nxcorr[1:-1, 1:-1]
6     cdef int maxI, maxJ
7     (_, _, _, (maxJ, maxI)) = cv2.minMaxLoc(nxcorr_small)
8     maxI += 1
9     maxJ += 1
10    # calculate offset using gaussian subpixel interpolation
11    cdef double dy = (nxcorr[maxI + 1, maxJ] - nxcorr[maxI - 1, maxJ]) / 2.0
12    cdef double dyy = (nxcorr[maxI + 1, maxJ] + nxcorr[maxI - 1, maxJ] - 2.0 *
      nxcorr[maxI, maxJ])
13    cdef double dx = (nxcorr[maxI, maxJ + 1] - nxcorr[maxI, maxJ - 1]) / 2.0
14    cdef double dxx = (nxcorr[maxI, maxJ + 1] + nxcorr[maxI, maxJ - 1] - 2.0 *
      nxcorr[maxI, maxJ])
15    cdef double dxy = (nxcorr[maxI + 1, maxJ + 1] - nxcorr[maxI + 1, maxJ - 1] -
      nxcorr[maxI - 1, maxJ + 1] + nxcorr[maxI - 1, maxJ - 1]) / 4.0
16    # calculate normalization factor
17    cdef double det = 0.0
18    if ((dxx * dyy - dxy * dxy) != 0.0):
19        det = 1.0 / (dxx * dyy - dxy * dxy)
20    # calculate new subpixel indices
21    cdef double ix = - (dyy * dx - dxy * dy) * det + maxJ - (lengthX/2)
22    cdef double iy = - (dxx * dy - dxy * dx) * det + maxI - (lengthY/2)
23    out = []
24    out.append(iy)
25    out.append(ix)
26    return out

```

---



## 5 Performance-Messungen der parallelen Implementation

Für die in diesem Kapitel durchgeführten Performance-Messungen wurde dasselbe Testsystem genutzt wie auch in Sektion 3.2 beschrieben wurde. Die einzige Änderung hierbei ist, dass in vielen Benchmarks mehr als ein Knoten beansprucht wurde. Auch die Datensätze und die geladenen Module haben sich nicht geändert. Wie auch bei der Performance-Analyse, sind aus allen in diesem Kapitel angegeben Zeiten die I/O-Zeiten herausgerechnet worden. Ebenfalls wurde hier auch wieder nach vier Aufwärmiterationen für fünf Iterationen des Programmes die Zeit gemessen.

### 5.1 Evaluierung der Optimierungen

#### 5.1.1 Parallelisierung

Auf der Abbildung 5.1 ist für die auf dem GitHub-Branch *mpi* verfügbare Version [CBS18] deutlich ein Beschleunigungsfaktor von ca. zwei bis vier gegenüber der vorgegebenen Implementierung erkennbar. Anzumerken ist hierbei, dass als Referenz für den Speed-Up die Laufzeit der vorgegebenen Implementierung auf einem Kern genutzt wurde. Ebenfalls wird ersichtlich, dass diese Lösung nur mit der Anzahl der Eingabebildpaare skaliert, weshalb nur die *Experiment 6 Lenses 200* und *Lenses 500* mit 24 Kernen schneller ist als mit zwölf. Wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, liegen alle Laufzeiten dieser Version unter 1.000 Sekunden. Auch hier sind die Messpunkte wieder dick hervorgehoben und die Skala der Gesamtzeitgraphen ist logarithmisch eingeteilt. Ein Rechenknoten besitzt 24 Kerne, wodurch die Einteilung der X-Achse die Grenze der Rechenknoten verdeutlicht.

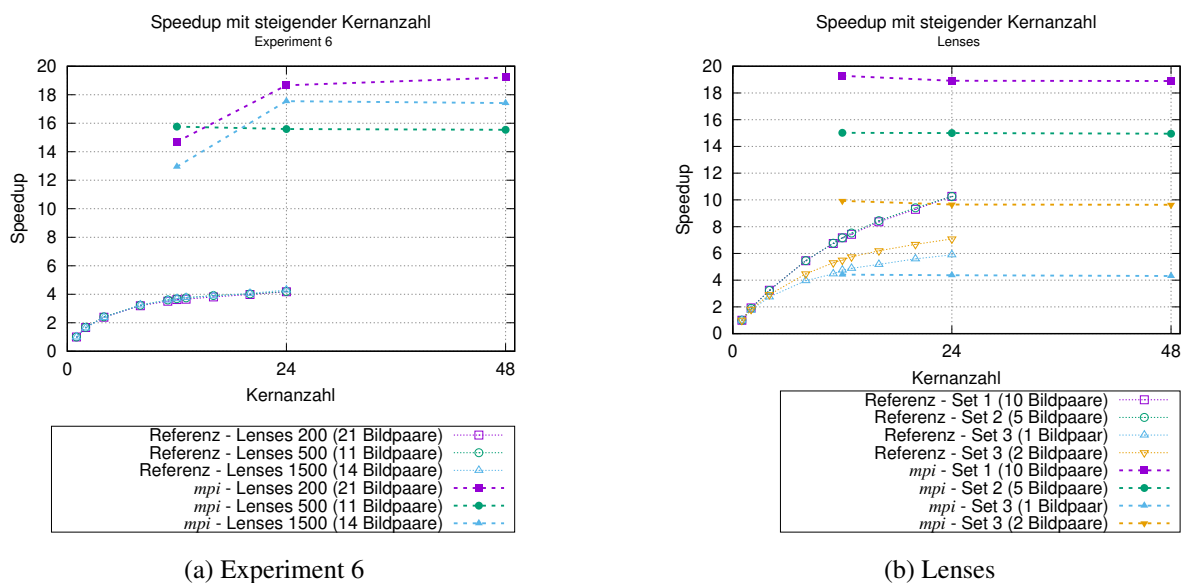


Abbildung 5.1: Speed-Up der *mpi* Implementierung gegenüber des von Cojocaru *et al.* implementierten Python-Codes

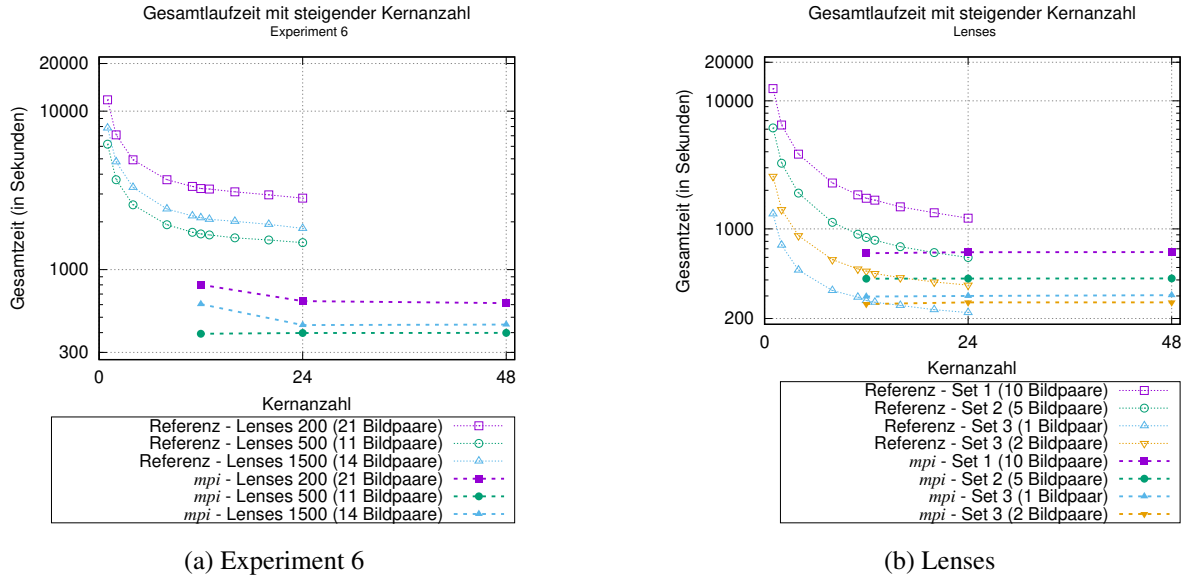


Abbildung 5.2: Gesamtlaufzeit der *mpi* Implementierung gegenüber des von Cojocar *et al.* implementierten Python-Codes

Wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, schneidet die auf dem Branch *mpi-advanced* verfügbare Version [CBS18] für 24 Kerne schlechter ab als die *mpi* Implementierung. Dies kann in der effizienteren Verteilung der Daten mittels der *joblib*-Bibliothek begründet liegen, da diese den in Linux effizient implementierten Fork-Befehl nutzt, wohingegen die *mpi-advanced*-Implementierung die Daten direkt kopiert [Gri+18]. Im Gegensatz zu der *mpi*-Implementierung skaliert diese Version aber mit der Anzahl der verfügbaren CPU-Kerne und nicht nur mit der Anzahl der Bildpaare. Anzumerken ist hier ebenfalls, dass die *mpi*-Implementierung bei wenigen Kernen zwar schneller ist, aber deutlich mehr Arbeitsspeicher benötigt. Währenddessen die *mpi-advanced*-Version unter Nutzung von 24 Kernen mit 64 GiB auskommt, benötigt die *mpi*-Version mehr als 128 GiB.

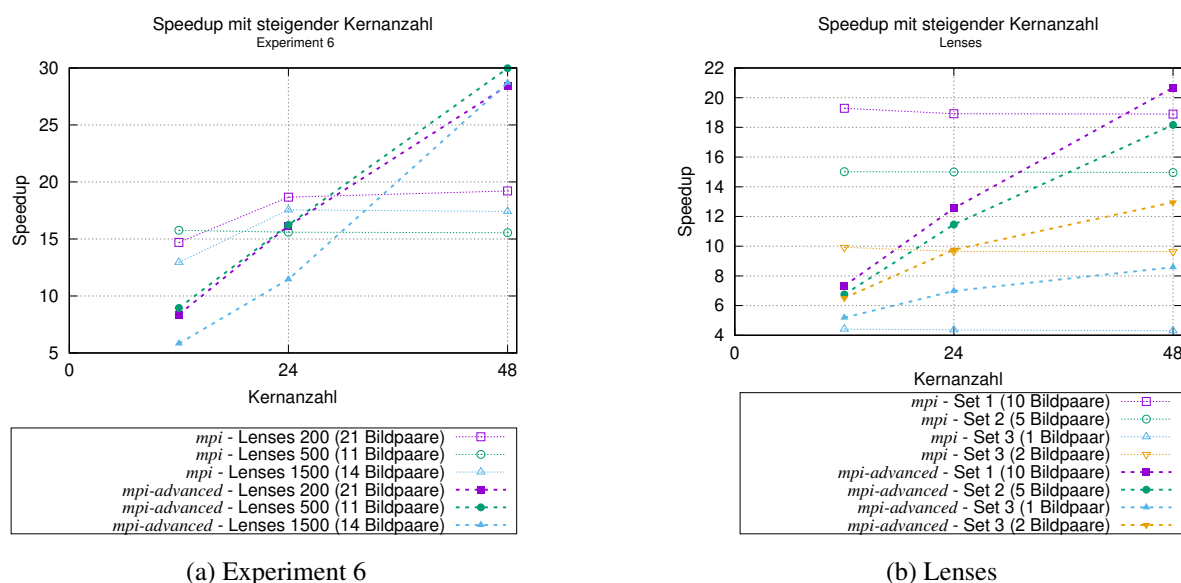
Auch in der Abbildung 5.3 wurde wieder die auf einem Kern ausgeführte vorgegebene Implementierung als Referenz genutzt.

### 5.1.2 Optimierung von Python-Engpässen

#### Nutzen bereits optimierter Funktionen

Wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, wurde mittels der Nutzung von bereits optimierten Funktionen ein Beschleunigungsfaktor von ca. vier für die *Experiment 6*-Datensätze und ein Faktor zwischen 1,2 und 1,5 für die *Lenses*-Datensätze erreicht. Der Speed-Up bei diesen Datensätzen war nicht so hoch, da diese weniger Bildpaare beinhalten und die Rechenzeit pro Bildpaar deutlich kleiner war, wodurch der Overhead durch das Senden der Daten einen größeren Einfluss auf die Gesamtlaufzeit hat. Die geringere Rechenzeit pro Bildpaar kommt durch die deutlich kleinere ROI, eine kleinere Korrelationsgröße  $R_{corr}$  und weniger zu korrigierenden Teilbilder zustande. Zusätzlich dazu entfällt die Notwendigkeit der Interpolation zwischen zwei verschiedenen Pixelgrößen, da hierfür nur ein Sensor im Einsatz war.



Abbildung 5.3: Speed-Up der *mpi-advanced* Implementierung gegenüber der *mpi*-Version

## Kompilieren

Die Abbildung 5.6 zeigt den Beschleunigungsfaktor der verschiedenen übersetzten Versionen gegenüber der Implementierung, welche bereits optimierte Funktionen nutzt. Hierbei ist deutlich ersichtlich, dass die Übersetzung des gesamten Programmes, welche auf dem *compiled*-Branch verfügbar ist, immer schneller als die *intrinsics*-Implementierung läuft. Der Grund für die höhere Leistung der *compiled*-Implementierung ist hierbei nicht bekannt. Die *numba*-Version hingegen schnitt immer deutlich schlechter als die anderen Versionen ab. Die Laufzeiten der *cython*- und der *compiled-advanced*-Versionen liegen nahe beieinander und bieten keinen Geschwindigkeitszuwachs gegenüber der *intrinsics*-Implementierung.

Die bereits gute Performance der *intrinsics*-Implementierung liegt in der intensiven Nutzung optimierter Funktionen begründet, welche von einer Übersetzung der Python-Codes unberührt bleiben. Die Performance der *numba*-Implementierung ist deutlich schlechter, da beim Aufruf einer JIT-kompilierten Funktion diese erst in einer Liste aus übersetzten Funktionen gesucht werden muss, bevor diese aufgerufen werden kann [PLA17]. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die übersetzten Funktionen eine geringe Laufzeit haben, aber dafür sehr oft aufgerufen werden. Der zweite Durchlauf allein, und damit auch die `nxcorr_disp()`-Funktion, wird im *Experiment 6 Lenses 200*-Datensatz über 5,3 Millionen mal aufgerufen.

## 5.2 Skalierung

Auf der Abbildung 5.7 ist eine lineare Skalierung gut erkennbar, bis die Anzahl der CPU-Kerne die Anzahl der Bildpaare übersteigt. Anschließend stagniert der Beschleunigungsfaktor, da einige Bildpaare zwar mit mehr Kernen schneller bearbeitet werden können, aber das Programm auf die Fertigstellung der restlichen Bildpaare warten muss, die nur einen Kern zur Verfügung haben. Ein ähnliches Laufzeitverhalten lässt sich jedes Mal beobachten, wenn die Kernanzahl ein Vielfaches der Bildpaaranzahl erreicht. Da die Verarbeitung eines einzelnen Bildpaares nicht komplett parallelisiert werden kann, flacht laut Amdahl's Gesetz der Graph mit steigender Kernanzahl ab [Amd67]. Die Gesamtlaufzeiten im Bezug auf die vorgegebene Implementierung ist in Abbildung 5.8 zu sehen.

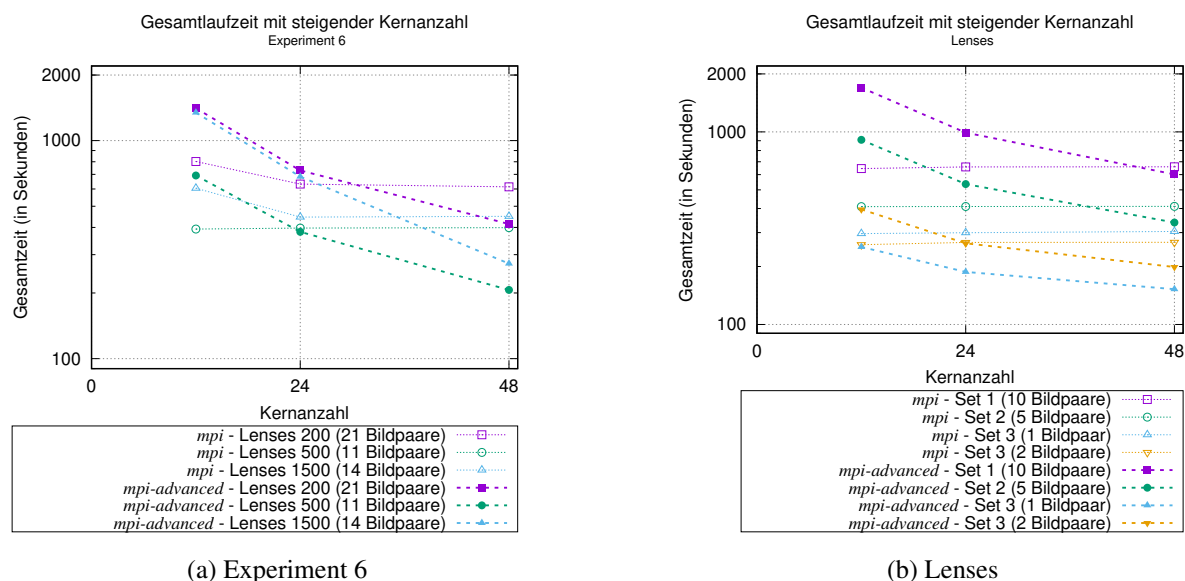
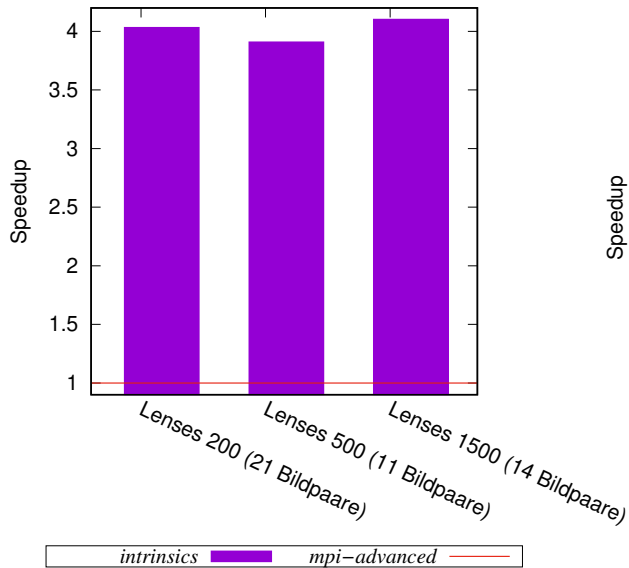


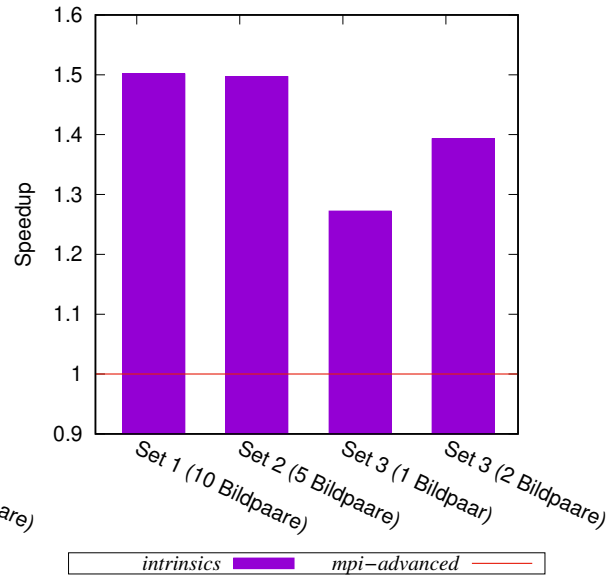
Abbildung 5.4: Gesamtlaufzeit der *advanced-mpi* Implementierung gegenüber des von Cojocar implementierten Python-Codes

Der Speed-Up-Graph in Abbildung 5.7 weist eine starke Skalierung auf, jedoch skaliert das Laufzeitverhalten schwach besser. Solange mehr Bildpaare als CPU-Kerne an der Berechnung beteiligt sind, skaliert das Programm nahezu linear. Das Effizienzoptimum wird somit erreicht, wenn die Anzahl der CPU-Kerne gleich der Anzahl der Bildpaare ist, da an diesem Punkt jeder Kern mit einem Bildpaar komplett ausgelastet ist und keine Zeit zum weiteren Verteilen der Daten aufgebracht werden muss.

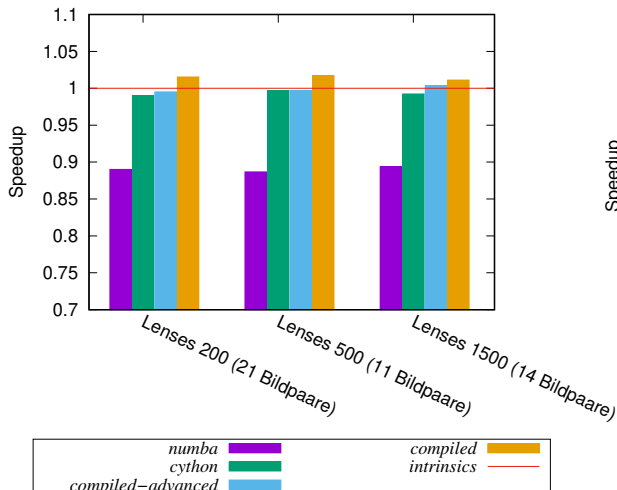
Eine Sättigung tritt bei allen Datensätzen ein, sobald mehr als 20 CPU-Kerne pro Bildpaar eingesetzt werden. An diesem Punkt wird die meiste Rechenzeit in nicht parallelisierten Abschnitten des Speckle-Trackings und in der Gradientenintegration verbraucht.

Speedups gegenüber der *mpi-advanced*-Implementierung  
Experiment 6

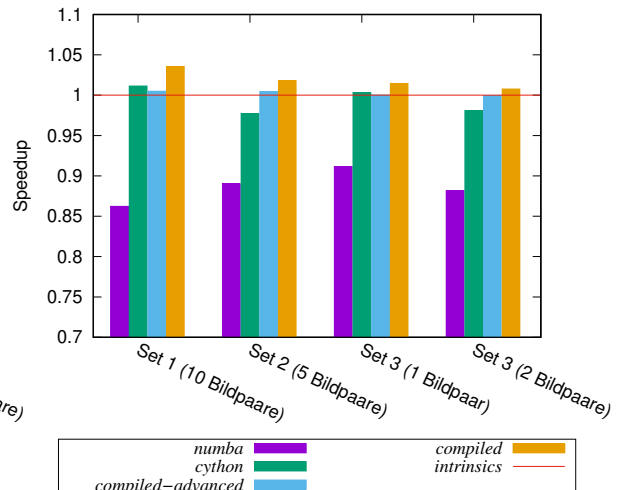
(a) Experiment 6

Speedups gegenüber der *mpi-advanced*-Implementierung  
Lenses

(b) Lenses

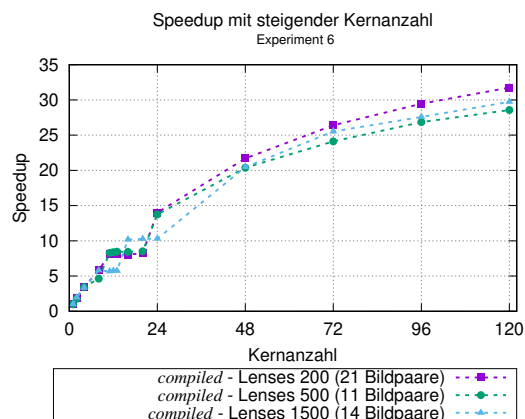
Abbildung 5.5: Speed-Up der *intrinsics* Implementierungen gegenüber der *mpi-advanced*-Implementierung mit zwölf KernenSpeedups gegenüber *intrinsics*  
Experiment 6

(a) Experiment 6

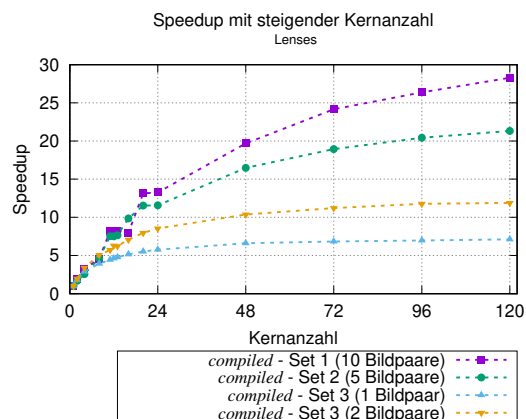
Speedups gegenüber *intrinsics*  
Lenses

(b) Lenses

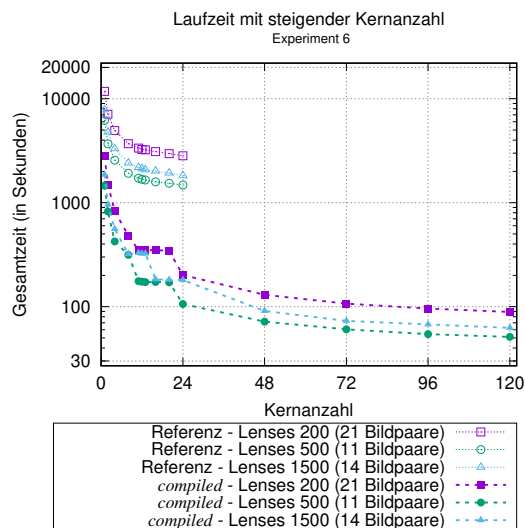
Abbildung 5.6: Speed-Ups der einzelnen Implementierungen gegenüber der *intrinsics* Implementierung mit zwölf Kernen



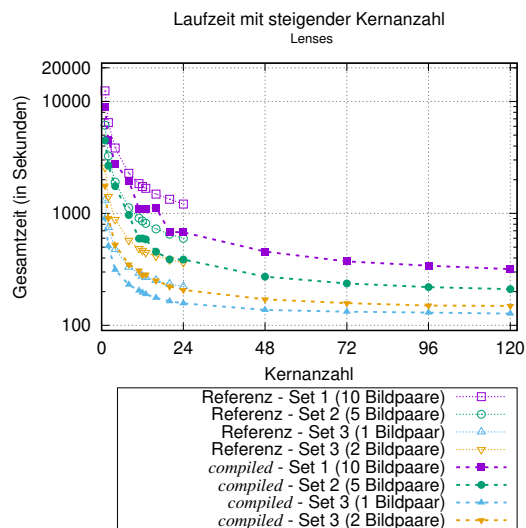
(a) Experiment 6



(b) Lenses

Abbildung 5.7: Speed-Up der *compiled* Implementierung

(a) Experiment 6



(b) Lenses

Abbildung 5.8: Gesamtlaufzeit der *compiled* Implementierung gegenüber des vorgegebenen Python-Codes

## 6 Auswertung

### 6.1 Wertung des Ergebnisses

Die Abbildung 6.1 zeigt einen deutlich erhöhten Speed-Up gegenüber der von Cojocar *et al.* entwickelten Python-Implementierung. Für die *Experiment 6*-Datensätze erreicht dieser unter der Verwendung von 120 Kernen einen Speed-Up von über 130 und für die *Lenses*-Datensätze liegt der maximale Beschleunigungsfaktor bei bis zu 40 für den *Set 1*-Datensatz. Referenz war hierbei die Laufzeit der Referenzimplementierung auf einem Kern. Bei der Wahl größerer Datensätze sind aufgrund mangelnder Parallelisierbarkeit der Bildpaare größere Beschleunigungsfaktoren zu erwarten.

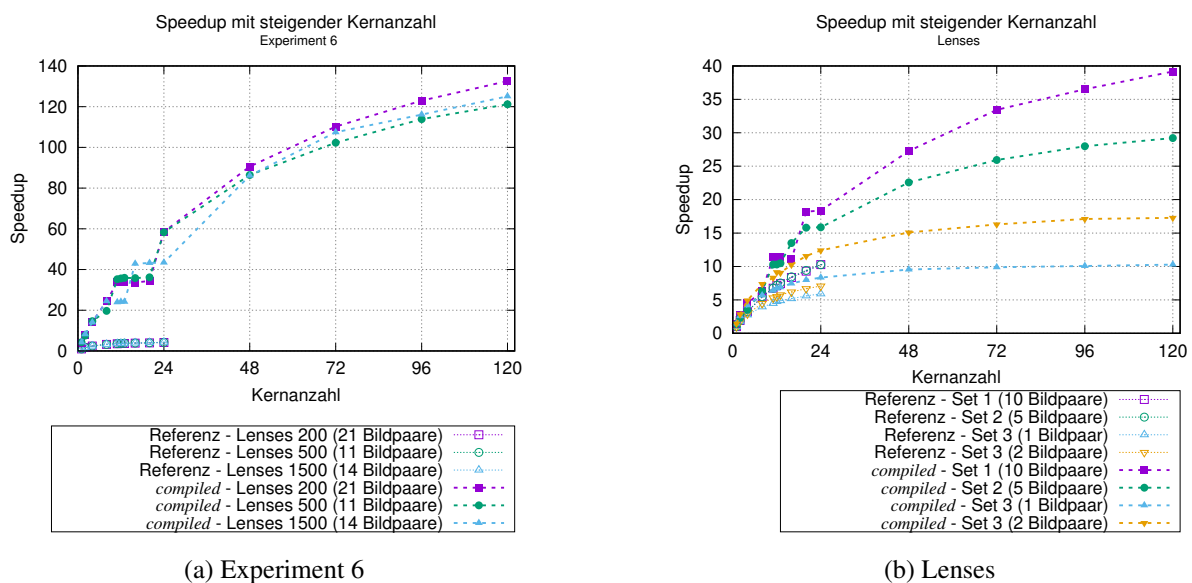


Abbildung 6.1: Speed-Up der *compiled* Implementierung gegenüber des von Cojocar implementierten Python-Codes

Trotz dieses erreichten Speed-Ups, müsste die Anzahl der Bildpaare und der Kerne bei weitem höher sein, um die Echtzeitfähigkeit des Programmes sicherzustellen. Dies ist in Größenordnungen von 2400 Bildpaaren und 2400 CPU-Kernen zu erwarten, was bereits 100 Taurus-Knoten wären.

### 6.2 Verbesserungsmöglichkeiten

Im Verlauf der Implementierung wurden viele der trivialsten Optimierungsmöglichkeiten implementiert. Während der letzten Iterationen der Implementierungen wurde allerdings auch weiteres Potential sichtbar. Beispielsweise ließe sich die Knoten-interne Kommunikation mit Intrakommunikatoren oder geteiltem Speicher optimieren, um den Kopieraufwand der Daten zu senken.

Obwohl in dieser Arbeit bereits viele Optimierungen implementiert wurden und ein hoher Speed-Up erreicht wurde, gibt es immer noch weiteres Potential. Die Verwendung der FFTW<sup>1</sup>-Bibliothek ist eine

<sup>1</sup><http://www.fftw.org/>

davon. Mithilfe dieser ist es möglich, die Gradientenintegration zu beschleunigen, indem beim Start des Programmes sogenannte *Wisdoms* erstellt werden, welche die Transformation eines Bildes in den Frequenzraum erheblich beschleunigen könnte.

Des Weiteren ist es möglich für die am häufigsten aufgerufenen Funktionen Datenblöcke zu bilden und diese zu verarbeiten, sodass der Overhead der Funktionsaufrufe sinkt. Dies bildet ebenfalls eine gute Grundlage, um diese Datenblockverarbeitung mittels *numpy*, *numexpr* oder *numba* weiter zu beschleunigen. Insbesondere kann hierbei auch die CUDA<sup>2</sup>- und OpenCL<sup>3</sup>-Schnittstelle von *numba* genutzt werden, um Berechnungen mittels General Purpose Computing on Graphics Processing Units (GPGPUs) auszulagern.

Eine weitere Möglichkeit liegt in einer Verbesserung des Belastungsausgleiches. Hierbei bestünde die Möglichkeit, die Bildpaare in Pakete zusammenzufassen und diese hintereinander zu bearbeiten, sodass ein durchgängiger Betrieb möglich wäre.

Auch Optimierungen am Algorithmus sind noch denkbar. Da aus dem Ergebnis des Template-Matchings nur die Position und der Wert des Maximums benötigt werden, ließe sich Bild und Template mit durch Skalierung in verminderter Auflösung matchen. Hierbei entstandene Ungenauigkeiten können behoben werden, indem in der Region des Maximums ein genaueres Match durchgeführt wird. Da das Match mit reduzierter Auflösung eine Heuristik über die maximal mögliche Übereinstimmung ist, kann anschließend in dieser der zweit höchste Wert betrachtet werden. Ist dieser größer als das Ergebnis des genauen Matches, besteht die Möglichkeit, dass dieses falsch ist und es kann auf den in der OpenCV-Bibliothek implementierten Template-Matching-Algorithmus zurückgegriffen werden. Ist die Auflösung des Templates und des Bildes jedoch nicht durch ein und denselben Skalierungsfaktor teilbar, so kann die Skalierung auf eine niedrigere Auflösung bereits erhebliche Zeit in Anspruch nehmen. Hierzu ähnliche Optimierungsmöglichkeiten, welche allerdings verlustbehaftet sind, wurden bereits von Cojocar *et al.* implementiert (siehe 2.2.2).

Zu guter Letzt besteht auch noch die Möglichkeit der Optimierung des Kalibrierungsteiles des Programmes.

---

<sup>2</sup><https://developer.nvidia.com/cuda-zone>

<sup>3</sup><https://www.khronos.org/opencl>

## Literatur

- [Amd67] AMDAHL, Gene M. Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large Scale Computing Capabilities. In: *Proceedings of the April 18-20, 1967, Spring Joint Computer Conference*. Atlantic City, New Jersey: ACM, 1967, S. 483–485. AFIPS '67 (Spring). Abgerufen unter DOI: 10.1145/1465482.1465560.
- [Ana+07] ANAND, Arun; PEDRINI, Giancarlo; OSTEN, Wolfgang; ALMORO, Percival. Wavefront sensing with random amplitude mask and phase retrieval. *Opt. Lett.* 2007, Jg. 32, Nr. 11, S. 1584–1586. Abgerufen unter DOI: 10.1364/OL.32.001584.
- [Beh+11] BEHNEL, Stefan; BRADSHAW, Robert; CITRO, Craig; DALCIN, Lisandro; SELJEBOTN, Dag Sverre; SMITH, Kurt. Cython: The Best of Both Worlds. *Computing in Science & Engineering*. 2011, Jg. 13, Nr. 2, S. 31–39. Abgerufen unter DOI: 10.1109/MCSE.2010.118.
- [Beh+17] BEHNEL, Stefan; BRADSHAW, Robert; DALCÍN, Lisandro; FLORISSON, Mark; MAKAROV, Vitja; SELJEBOTN, Dag Sverre. *Cython: C-Extensions for Python*. 2017. Auch verfügbar unter: <http://cython.org/>. Abgerufen: 24. Februar 2018.
- [BR09] BEN ASHER, Yosi; ROTEM, Nadav. The Effect of Unrolling and Inlining for Python Bytecode Optimizations. In: *Proceedings of SYSTOR 2009: The Israeli Experimental Systems Conference*. Haifa, Israel: ACM, 2009, 14:1–14:14. SYSTOR '09. ISBN 978-1-60558-623-6. Abgerufen unter DOI: 10.1145/1534530.1534550.
- [Bér13] BÉRUJON, Sébastien. *Méetrologie en ligne de faisceaux et d'optiques X de synchrotrons*. 2013. Auch verfügbar unter: <http://www.theses.fr/2013GRENY010>. Dissertation. Université de Grenoble. Thèse de doctorat dirigée par Ziegler, Eric et Sawhney, Kawal Physique Grenoble 2013.
- [Bér+12] BÉRUJON, Sébastien; ZIEGLER, Eric; CERBINO, Roberto; PEVERINI, Luca. Two-Dimensional X-Ray Beam Phase Sensing. *Phys. Rev. Lett.* 2012, Jg. 108, S. 158102. Abgerufen unter DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.158102.
- [BZC15] BÉRUJON, Sébastien; ZIEGLER, Eric; CLOETENS, Peter. X-ray pulse wavefront metrology using speckle tracking. *Journal of Synchrotron Radiation*. 2015, Jg. 22, Nr. 4, S. 886–894. ISSN 1600-5775. Abgerufen unter DOI: 10.1107/S1600577515005433.
- [CB17] COJOCARU, Elena-Ruxandra; BÉRUJON, Sébastien. *Wavefront-Sensor*. 2017. Auch verfügbar unter: <https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/tree/6f06a83babb66902fb83b7dfcdb9b0cf9f18acc0>. (Privat).
- [CBS18] COJOCARU, Elena-Ruxandra; BÉRUJON, Sébastien; SCHENKE, Jonas. *Wavefront-Sensor*. 2018. Auch verfügbar unter: <https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/>. (Privat).
- [CBZ17] COJOCARU, Ruxandra; BÉRUJON, Sébastien; ZIEGLER, Eric. *Experiment 6 Datasets*. 2017. Auch verfügbar unter: [https://www.dropbox.com/s/clpz2jp3yyki3pr/exp6\\_data.zip?dl=0](https://www.dropbox.com/s/clpz2jp3yyki3pr/exp6_data.zip?dl=0).
- [Dai09] DAILY, Jeffrey A. *GAiN: Distributed Array Computation with Python*. 2009. Abgerufen unter DOI: 10.2172/1006323. Dissertation.

- [Dal+11] DALCIN, Lisandro D.; PAZ, Rodrigo R.; KLER, Pablo A.; COSIMO, Alejandro. Parallel distributed computing using Python. *Advances in Water Resources*. 2011, Jg. 34, Nr. 9, S. 1124–1139. ISSN 0309-1708. Abgerufen unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.04.013>. New Computational Methods and Software Tools.
- [DPS05] DALCÍN, Lisandro; PAZ, Rodrigo; STORTI, Mario. MPI for Python. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2005, Jg. 65, Nr. 9, S. 1108–1115. ISSN 0743-7315. Abgerufen unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2005.03.010>.
- [Dal+08] DALCÍN, Lisandro; PAZ, Rodrigo; STORTI, Mario; DELÍA, Jorge. MPI for Python: Performance improvements and MPI-2 extensions. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 2008, Jg. 68, Nr. 5, S. 655–662. ISSN 0743-7315. Abgerufen unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2007.09.005>.
- [Duf09] DUFOUR, Mark. *Shed Skin-An experimental (restricted) Python to C++ compiler (2009-09-30)*. 2009.
- [Enk+11] ENKOVAARA, Jussi; ROMERO, Nichols A.; SHENDE, Sameer; MORTENSEN, Jens J. GPAW - massively parallel electronic structure calculations with Python-based software. *Procedia Computer Science*. 2011, Jg. 4, S. 17–25. ISSN 1877-0509. Abgerufen unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.003>. Proceedings of the International Conference on Computational Science, ICCS 2011.
- [FC88] FRANKOT, R. T.; CHELLAPPA, R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1988, Jg. 10, Nr. 4, S. 439–451. ISSN 0162-8828. Abgerufen unter DOI: 10.1109/34.3909.
- [Gri+18] GRISEL, Olivier; VAROQUAUX, Gael; BESSON, Lilian; ESTÈVE, Loïc; ZEILEMAKER, Niels. *Embarrassingly parallel for loops*. 2018. Auch verfügbar unter: <https://github.com/joblib/joblib/blob/master/doc/parallel.rst#old-multiprocessing-backend>. Abgerufen: 24. Februar 2018.
- [GBA13] GUELTON, Serge; BRUNET, Pierrick; AMINI, Mehdi. Compiling Python modules to native parallel modules using Pythran and OpenMP annotations. *Python for High Performance and Scientific Computing*. 2013, Jg. 2013.
- [GFB14] GUELTON, Serge; FALCOU, Joël; BRUNET, Pierrick. Exploring the Vectorization of Python Constructs Using Pythran and Boost SIMD. In: *Proceedings of the 2014 Workshop on Programming Models for SIMD/Vector Processing*. Orlando, Florida, USA: ACM, 2014, S. 79–86. WPMVP '14. ISBN 978-1-4503-2653-7. Abgerufen unter DOI: 10.1145/2568058.2568060.
- [Gui+11] GUIZAR-SICAIROS, Manuel; NARAYANAN, Suresh; STEIN, Aaron; METZLER, Meredith; SANDY, Alec R.; FIENUP, James R.; EVANS-LUTTERODT, Kenneth. Measurement of hard x-ray lens wavefront aberrations using phase retrieval. *Applied Physics Letters*. 2011, Jg. 98, Nr. 11, S. 111108. Abgerufen unter DOI: 10.1063/1.3558914.
- [HF17] HAND, Nick; FENG, Yu. Nbodykit: A Python Toolkit for Cosmology Simulations and Data Analysis on Parallel HPC Systems. In: *Proceedings of the 7th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing*. Denver, CO, USA: ACM, 2017, 7:1–7:10. PyHPC'17. ISBN 978-1-4503-5124-9. Abgerufen unter DOI: 10.1145/3149869.3149876.
- [Ill14] ILLMER, Joachim. *Parallele Python-Programmierung auf Multi-Core-Architekturen und Grafikkarten für numerische Algorithmen aus der Strömungstechnik und den Materialwissenschaften*. 2014. Auch verfügbar unter: <http://elib.dlr.de/92043/>. Bachelor's. Duale Hochschule Baden-Württemberg, Mannheim. Betreuer: Dr.-Ing. Achim Baser mann (DLR, Simulations- und Softwaretechnik), M. Sc. Melven Röhrig-Zöllner (DLR,



- Simulations- und Softwaretechnik), Prof. Dr. Harald Kornmayer (Duale Hochschule Baden-Württemberg, Mannheim).
- [KE14] KLEMM, Michael; ENKOVAARA, Jussi. pyMIC: A Python offload module for the Intel Xeon Phi coprocessor. *Proceedings of PyHPC*. 2014.
  - [Knü+12] KNÜPFER, Andreas *et al.* Score-P: A Joint Performance Measurement Run-Time Infrastructure for Periscope, Scalasca, TAU, and Vampir. In: BRUNST, Holger; MÜLLER, Matthias S.; NAGEL, Wolfgang E.; RESCH, Michael M. (Hrsg.). *Tools for High Performance Computing 2011*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 79–91. ISBN 978-3-642-31476-6.
  - [Kov04] KOVESI, Peter. *FRANKOTCHELLAPPA*. 2004. Auch verfügbar unter: <http://www.peterkovesi.com/matlabfns/Shapelet/frankotchellappa.m>. Abgerufen: 12. Januar 2018.
  - [LPS15] LAM, Siu Kwan; PITROU, Antoine; SEIBERT, Stanley. Numba: A LLVM-based Python JIT Compiler. In: *Proceedings of the Second Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC*. Austin, Texas: ACM, 2015, 7:1–7:6. LLVM '15. ISBN 978-1-4503-4005-2. Abgerufen unter DOI: 10.1145/2833157.2833162.
  - [Lew94] LEWIS, J.P. Fast Template Matching. 1994, Jg. 95.
  - [Mar17] MARKWARDT, Ulf. *HardwareTaurus - Compendium - Foswiki*. 2017. Auch verfügbar unter: <https://doc.zih.tu-dresden.de/hpc-wiki/bin/view/Compendium/HardwareTaurus>. Abgerufen: 24. Februar 2018.
  - [Mer+03] MERCÈRE, Pascal *et al.* Hartmann wave-front measurement at 13.4 nm with  $\lambda$ EUV/120 accuracy. *Opt. Lett.* 2003, Jg. 28, Nr. 17, S. 1534–1536. Abgerufen unter DOI: 10.1364/OL.28.001534.
  - [ML16] MORTENSEN, Mikael; LANGTANGEN, Hans Petter. High performance Python for direct numerical simulations of turbulent flows. *Computer Physics Communications*. 2016, Jg. 203, S. 53–65. ISSN 0010-4655. Abgerufen unter DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.02.005>.
  - [Oli07] OLIPHANT, T. E. Python for Scientific Computing. *Computing in Science Engineering*. 2007, Jg. 9, Nr. 3, S. 10–20. ISSN 1521-9615. Abgerufen unter DOI: 10.1109/MCSE.2007.58.
  - [PGH11] PEREZ, F.; GRANGER, B. E.; HUNTER, J. D. Python: An Ecosystem for Scientific Computing. *Computing in Science Engineering*. 2011, Jg. 13, Nr. 2, S. 13–21. ISSN 1521-9615. Abgerufen unter DOI: 10.1109/MCSE.2010.119.
  - [PLA17] PITROU, Antoine; LAM, Siu Kwan; ANDERSON, Todd A. *Just-in-Time compilation*. 2017. Auch verfügbar unter: <https://github.com/numba/numba/blob/master/docs/source/reference/jit-compilation.rst>. Abgerufen: 24. Februar 2018.
  - [Pro17] PROJECT, The Open MPI. *MPI\_Init\_thread(3) man page (version 2.0.4)*. 2017. Auch verfügbar unter: [https://www.open-mpi.org/doc/v2.0/man3/MPI\\_Init\\_thread.3.php](https://www.open-mpi.org/doc/v2.0/man3/MPI_Init_thread.3.php). Abgerufen: 24. Februar 2018.
  - [Rot+17] ROTHAND, Thomas; BARETT, Raymond; BÉRUJON, Sébastien; CELESTE, Rafael. *Lenses Datasets*. 2017. Auch verfügbar unter: [https://www.dropbox.com/s/ykljm0vzvzhqmx/wf\\_rec\\_lenses\\_sets.zip?dl=0](https://www.dropbox.com/s/ykljm0vzvzhqmx/wf_rec_lenses_sets.zip?dl=0).
  - [Sch18a] SCHENKE, Jonas. *CPU Utilization*. 2018. Auch verfügbar unter: [https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/blob/f2fc5c2e5f8b4ef0e9b3ca3a4e770db67f230588/doc/cpu\\_util.md](https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/blob/f2fc5c2e5f8b4ef0e9b3ca3a4e770db67f230588/doc/cpu_util.md). (Privat).

- [Sch18b] SCHENKE, Jonas. *Loaded Libraries*. 2018. Auch verfügbar unter: [https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/blob/cb7fd24ea64ad0fef0af93ba0dfb9f04f6487382/doc/loaded\\_libs.txt](https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/blob/cb7fd24ea64ad0fef0af93ba0dfb9f04f6487382/doc/loaded_libs.txt). (Privat).
- [Seh+17] SEHRISH, S.; KOWALKOWSKI, J.; PATERNO, M.; GREEN, C. Python and HPC for High Energy Physics Data Analyses. In: *Proceedings of the 7th Workshop on Python for High-Performance and Scientific Computing*. Denver, CO, USA: ACM, 2017, 8:1–8:8. PyHPC’17. ISBN 978-1-4503-5124-9. Abgerufen unter DOI: 10.1145/3149869.3149877.
- [SA17] SHABUNIN, Maksim; ALEKHIN, Alexander. *Template Matching*. 2017. Auch verfügbar unter: [https://github.com/opencv/opencv/blob/master/doc/py\\_tutorials/py\\_imgproc/py\\_template\\_matching/py\\_template\\_matching.markdown](https://github.com/opencv/opencv/blob/master/doc/py_tutorials/py_imgproc/py_template_matching/py_template_matching.markdown). Abgerufen: 21. Januar 2018.
- [WCV11] WALT, Stéfan van der; CHRIS COLBERT, S; VAROQUAUX, Gael. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. 2011, Jg. 13, S. 22–30.
- [Wei+05] WEITKAMP, Timm; NÖHAMMER, Bernd; DIAZ, Ana; DAVID, Christian; ZIEGLER, Eric. X-ray wavefront analysis and optics characterization with a grating interferometer. *Applied Physics Letters*. 2005, Jg. 86, Nr. 5, S. 054101. Abgerufen unter DOI: 10.1063/1.1857066.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsaufbau . . . . .	10
2.2	Kalibrierung . . . . .	11
2.3	Übersicht der Template-Matching-Parameter im zweiten Durchlauf . . . . .	12
2.4	Algorithmen . . . . .	13
2.5	Eingabe . . . . .	14
2.6	Gradient . . . . .	14
2.7	Ausgabe . . . . .	15
2.8	Algorithmen . . . . .	15
3.1	Gesamtlaufzeiten . . . . .	21
3.2	Speed-Up . . . . .	22
3.3	Anteile der Laufzeiten . . . . .	22
3.4	Anteile der Laufzeiten des Speckle-Tracking-Algorithmus . . . . .	23
3.5	Anteile der Laufzeiten der langsamsten Funktionen . . . . .	23
4.1	Verteilung . . . . .	27
5.1	Speed-Up der <i>mpi</i> Implementierung gegenüber des von Cojocar <i>et al.</i> implementierten Python-Codes . . . . .	31
5.2	Gesamtlaufzeit der <i>mpi</i> Implementierung gegenüber des von Cojocar <i>et al.</i> implementierten Python-Codes . . . . .	32
5.3	Speed-Up der <i>mpi-advanced</i> Implementierung gegenüber der <i>mpi</i> -Version . . . . .	33
5.4	Gesamtlaufzeit der <i>advanced-mpi</i> Implementierung gegenüber des von Cojocar implementierten Python-Codes . . . . .	34
5.5	Speed-Up der <i>intrinsics</i> Implementierungen gegenüber der <i>mpi-advanced</i> -Implementierung mit zwölf Kernen . . . . .	35
5.6	Speed-Ups der einzelnen Implementierungen gegenüber der <i>intrinsics</i> Implementierung mit zwölf Kernen . . . . .	35
5.7	Speed-Up der <i>compiled</i> Implementierung . . . . .	36
5.8	Gesamtlaufzeit der <i>compiled</i> Implementierung gegenüber des vorgegebenen Python-Codes . . . . .	36
6.1	Speed-Up der <i>compiled</i> Implementierung gegenüber des von Cojocar implementierten Python-Codes . . . . .	37



## Listings

4.1	Parallelisierung mittels der in MPI implementierten Version . . . . .	26
4.2	Parallelisierung mittels der joblib-Bibliothek . . . . .	26
4.3	Ausgabe der Programme . . . . .	26
4.4	Finden des Maximums einer Matrix . . . . .	27
4.5	Finden des Maximums einer Matrix mittels NumPy und OpenCV . . . . .	27
4.6	Berechnung des Signal-Rausch-Verhältnisses . . . . .	27
4.7	Evaluierung der Korellationsmethode . . . . .	28
4.8	Übergabe der Korellationsmethode als Variable . . . . .	28
4.9	Die in Cython optimierte Funktion norm_xcorr() . . . . .	29
4.10	Die in Cython optimierte Funktion nxcorr_disp() . . . . .	29



## Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter der Datensatztypen gemäßCojocarú <i>et al.</i> [CB17]	21
3.2	Anzahl der Bildpaare der Datensätze gemäßCojocarú <i>et al.</i> [CB17]	21





## Erklärungen zum Urheberrecht

Die hier präsentierte Lösung basiert auf dem von Elena-Ruxandra Cojocaru implementierten Python Code, welcher wiederum auf Grundlage des MATLAB-Codes von Sébastien Bérújon erstellt wurde. Der Code der ursprünglichen Implementierung lässt sich auf dem GitHub-Repository *Wavefront-Sensor* unter der General Public License finden<sup>1</sup> [CB17].

Ebenso wurden, mit Erlaubniss der Ersteller, an der Beamline BM05 der ESRF gemessene Daten zum Testen und Evaluieren verwendet. Dies waren die Datensätze *Experiment 6*, welche am 24. September 2017 von Ruxandra Cojocaru, Sébastien Bérújon und Eric Ziegler aufgenommen wurde und die *Lenses*-Datensätze, welche am zehnten April 2017 von Thomas Rothand, Raymond Barett, Sébastien Bérújon and Rafael Celeste erfasst wurden.

Zur Implementierung des Wellenfrontrekonstruktionsalgorithmus wurden viele Open Source-Bibliotheken verwendet. Folgende Bibliotheken wurden hier besonders intensiv genutzt:

- Cython (Apache Lizenz<sup>2</sup>)
- EdfFile.py (GPL Version 2<sup>3</sup>)
- joblib (BSD<sup>4</sup>)
- matplotlib (matplotlib Lizenz<sup>5</sup>)
- mpi4py (BSD<sup>4</sup>)
- numba (BSD<sup>4</sup>)
- NumPy (BSD 2.0<sup>6</sup>)
- OpenCV (BSD<sup>4</sup>)
- Pillow (Standard PIL Lizenz<sup>7</sup>)
- Python (Python Software Foundation License<sup>8</sup>)
- SciPy (SciPy Lizenz<sup>9</sup>)

<sup>1</sup><https://github.com/ComputationalRadiationPhysics/Wavefront-Sensor/blob/master/LICENSE>

<sup>2</sup><https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0>

<sup>3</sup><https://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html>

<sup>4</sup><https://opensource.org/licenses/BSD-2-Clause>

<sup>5</sup><https://matplotlib.org/users/license.html>

<sup>6</sup><https://opensource.org/licenses/BSD-3-Clause>

<sup>7</sup><http://www.pythonware.com/products/pil/license.htm>

<sup>8</sup><https://www.python.org/download/releases/2.7/license/>

<sup>9</sup><https://scipy.org/scipylib/license.html>

