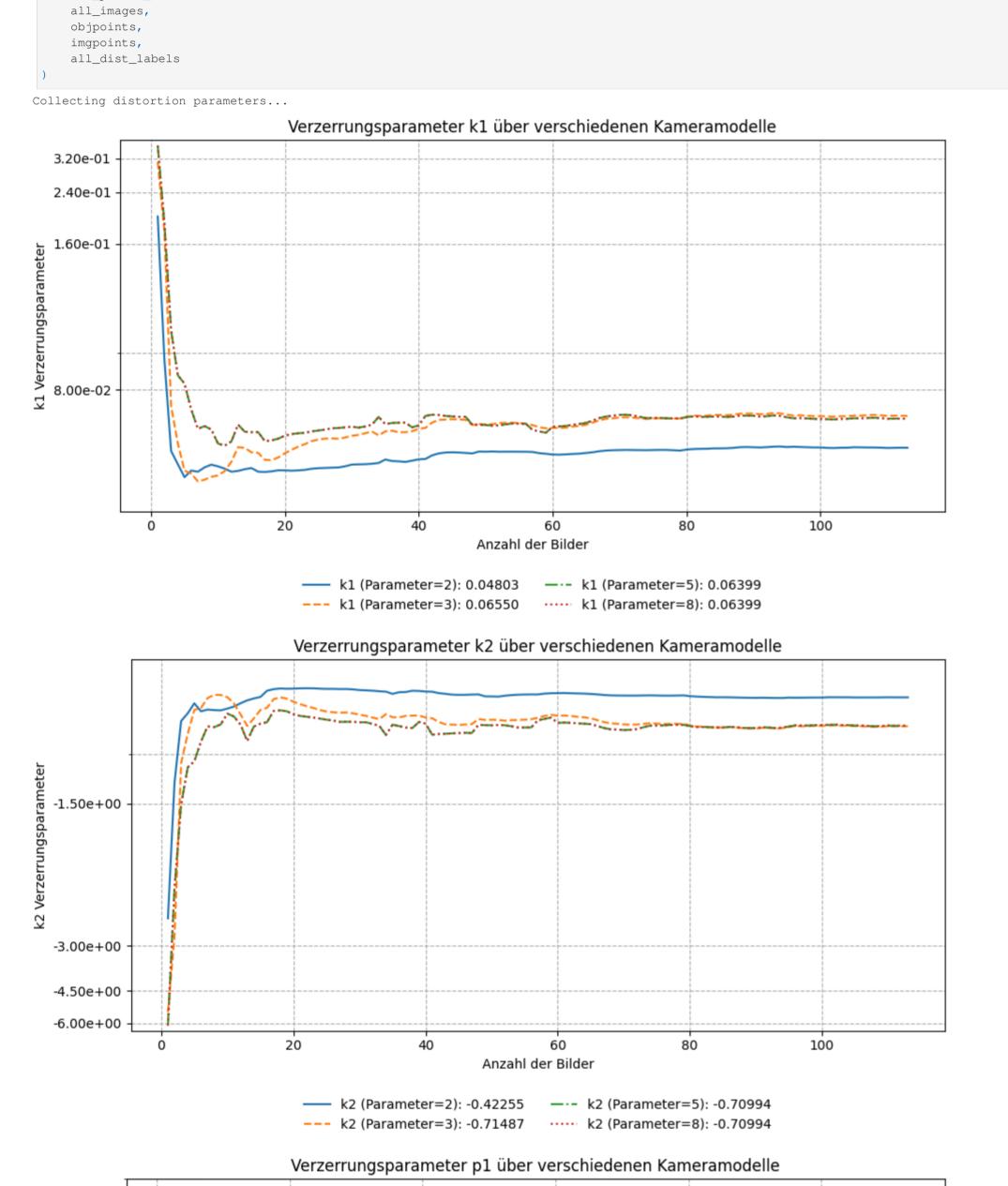
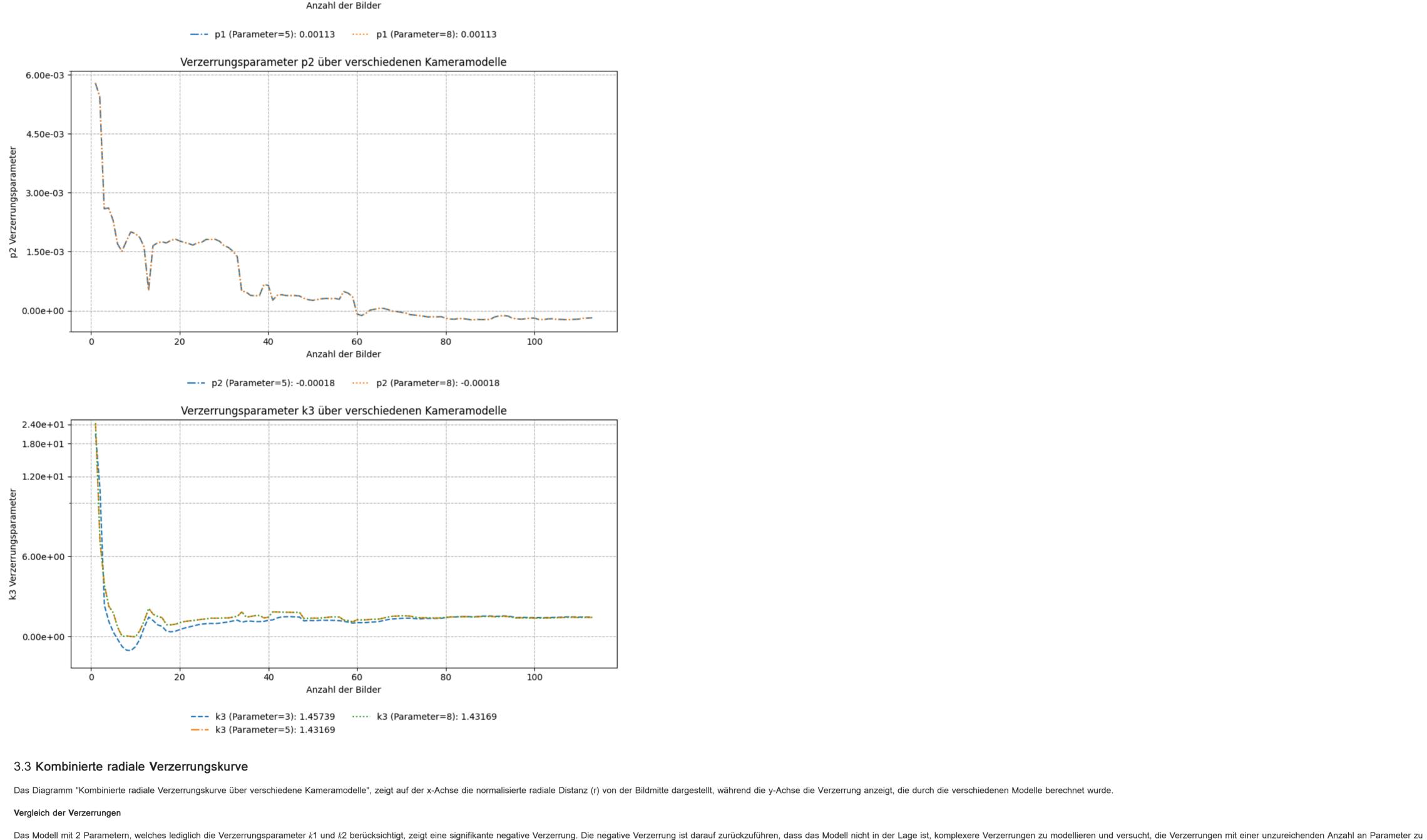
In []: import glob import importlib import cameramodel_comparison importlib.reload(cameramodel_comparison) from cameramodel_comparison import (run_dis_plot, run_combined_plot, get_image_points In []: #DATA all_images = glob.glob("./data/SD128_35mm/*.JPG") num_params_list = [2, 3, 5, 8] all_dist_labels = ["k1", "k2", "p1", "p2", "k3"] objpoints, imgpoints = get_image_points(all_images) Praktikumsbericht - Analyse der Verzerrungsparameter unter Verwendung unterschiedlicher Kalibrierungsmodelle in OpenCV Inhaltsverzeichnis 1. Einleitung A. Ziel 2. Methodik A. Bildaufnahme B. Kamerakalibrierung mit unterschiedlichen Modellen C. Analyse der radialen und tangentialen Verzerrungsparameter D. Analyse der kombinierten radialen Verzerrung E. Analyse des Reprojektionsfehlers und Akaike-Informationskriteriums (AIC) 3. Resultate A. Radiale Verzerrungsparameter k₁, k₂, k₃ B. Tangentiale Verzerrungsparameter p₁, p₂ C. Kombinierte radiale Verzerrungskurve D. Reprojektionsfehler (RPE) und Akaike-Informationskriterium (AIC) 4. Zusammenfassung 1. Einleitung Die Kamerakalibrierung ist ein Datenanpassungsproblem, bei dem die Wahl des richtigen Kalibrierungsmodells wichtig ist, um die theoretischen Verzerrungsparameter optimal an die aufgenommenen Bilder anzupassen. Innerhalb der OpenCV-Bibliothek stehen verschiedene Kalibrierungsmodelle zur Verfügung die unterschiedliche Kombinationen radialer (k1, k2, k3, k4, k₅, k₆) und tangentialer (p₁, p₂) Verzerrungskoeffizienten berücksichtigen. ¹Quelle: Calib.io 1.1 Ziel Eignung der Modelle anhand des Reprojektionsfehlers (RPE) und des Akaike-Informationskriteriums (AIC). 2. Methodik 2.1 Bildaufnahme Im Rahmen der Kamerakalibrierung in einem Single-Camera-Setup wurden insgesamt 114 Fotos aufgenommen. Die Aufnahmen wurden mit einem feststehenden Stativ durchgeführt, wobei ein Schachbrettmuster als Kalibrierungsobjekt diente. Das Schachbrettmuster wurde dabei aus verschiedenen Posen aufgenommen, wobei auch geneigte Positionen sowie ein kontinuierliches Verschieben des Schachbrettes berücksichtigt wurden, um eine umfassende Kalibrierung der Kamera zu gewährleisten. 2.2 Kamerakalibrierung mit unterschiedlichen Modellen Im Rahmen der Kalibrierung wurden vier verschiedene Kalibrierungsmodelle verwendet, die jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Verzerrungsparametern berücksichtigten. • Modell 2: Verwendung von 2 Verzerrungsparametern (radiale Verzerrung, k1, k2). • Modell 3: Verwendung von 3 Verzerrungsparametern (radiale Verzerrung, k₁, k₂, k₃). • Modell 5: Verwendung von 5 Verzerrungsparametern (radiale und tangentiale Verzerrung, k₁, k₂, k₃, p₁, p₂). • Modell 8: 8 Verzerrungsparameter (k1, k2, k3, p1, p2). Die zusätzlichen Parameter k4, k5, k6 wurden nicht berücksichtigt, da OpenCV diese Parameter automatisch auf 0 setzt, wenn keine entsprechende Verzerrung höheren Grades (beschrieben durch k4, k5, k6) im Bild detektiert wird. ²Quelle: OpenCV Dokumentation 2.3 Analyse der radialen und tangentialen Verzerrungsparameter Die Kalibrierung wurde für jedes Bild durchgeführt, wobei die Anzahl der verwendeten Bilder schrittweise erhöht wurde. Für jedes Kalibrierungsmodell wurden die Verzerrungskoeffizienten (k₁, k₂, k₃, p₁, p₂) ermittelt und in Abhängigkeit von der Bildanzahl analysiert. Es wurde untersucht, wie sich diese Verzerrungsparameter bei den verschiedenen Kamerakalibrierungsmodellen verhalten und wie sie mit zunehmender Anzahl von Kalibrierungsparameter bei einer bestimmten Bildanzahl erreicht wird, was darauf hinweist, dass eine ausreichende Menge an Daten für eine präzise Kalibrierung vorhanden ist. 2.4 Analyse der kombinierten radialen Verzerrung Die Analyse radialer Verzerrungskoeffizienten erfordert eine kombinierte Betrachtung, da sie in gegenseitiger Abhängigkeit stehen und gemeinsam die Gesamtverzerrung des Bildes bestimmen. Nur durch eine kombinierte Analyse kann ein umfassendes Verständnis der Verzerrungscharakteristik gewonnen werden. Die Verzerrung wird durch folgende Gleichung modelliert, die beschreibt, wie die Verzerrung als Funktion des radialen Abstands r von der Bildmitte berechnet wird: $\text{Verzerrung} = k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6$ ³Quelle: Mathworks wobei: • k₁, k₂, k₃ die Verzerrungskoeffizienten sind • r die normalisierte radiale Distanz ist, berechnet als $r^2 = x^2 + y^2$. 2.5 Analyse des Reprojektionsfehlers und Akaike-Informationskriteriums (AIC) Der Reprojektionsfehler (RPE) wurde für jede mögliche Anzahl von Kalibrierungsbildern berechnet, wobei die Anzahl der verwendeten Bilder schrittweise erhöht wurde. Der RPE wurde zusätzlich als Qualitätsmetrik verwendet, um die Genauigkeit der Kalibrierung zu bewerten. Der RPE misst die Differenz zwischen den projizierten Punkten (basierend auf den kalibrierten Parametern) und den tatsächlich erfassten Bildpunkten. Ein niedriger RPE deutet auf eine hohe Genauigkeit der Kalibrierung hin. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der RPE unter Verwendung der L2-Norm (OpenCV) berechnet. $ext{RPE} = rac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i'\|_{L2}$ ⁴Quelle: OpenCV Dokumentation wobei: • N die Anzahl der Bildpunkte ist • x_i die tatsächlichen Bildpunkte und $x_{i'}$ die projizierten Bildpunkte darstellt. Zur Evaluierung der Modelle wurde zusätzlich zum RPE das Akaike-Informationskriterium (AIC) berechnet. Das AIC berücksichtigt sowohl die Anpassungsgüte des Modells, welche durch die Anzahl der geschätzten Parameter definiert ist. Das allgemeine AIC wird durch die folgende Formel berechnet: $AIC = 2k - 2\ln(\hat{L})$ ⁵Quelle: Scribbr wobei: • k die Anzahl der Modellparameter ist • L die maximale Likelihood-Funktion darstellt. Die AIC-Formel wurde angepasst, indem die maximale Likelihood L durch den Reprojektionsfehler (RPE) ersetzt wurde, der als Ersatzindikator für die Anpassungsgüte dient. Das angepasste AIC wurde durch die folgende Formel berechnet: $AIC = 2k + n \ln(RPE)$ wobei: k die Anzahl der Modellparameter sind • n die Anzahl der verwendeten Bildpunkte. 3. Resultate 3.1.1 **Radiale Verzerrungsparameter *k₁, k₂, k₃*** Die radiale Verzerrung (k₁, k₂, k₃) entsteht, wenn Lichtstrahlen in der Nähe der Ränder eines Objektivs stärker abgelenkt werden als im optischen Zentrum. Die Verzerrung kann entweder als Kissenverzerrung, bei der die Bildränder nach außen gewölbt erscheinen (negative radiale Verzerrung). ¹Quelle: Mathworks Die nachfolgenden Diagramme, welche den Titel "Verzerrungsparameter über verschiedene Kameramodelle" tragen, zeigen auf der x-Achse die Anzahl der Bilder und auf der y-Achse den jeweiligen Wert des Verzerrungsparameters. Initiale Schwankungen und Stabilisierung Es lässt sich beobachten, dass alle drei Modelle (mit 3, 5 und 8 Parametern) zu Beginn eine gewisse Schwankung in den Verzerrungsparametern zutrifft. Diese Schwankungen sind bei den Modellen mit 5 und 8 Parametern weniger stark ausgeprägt. Im Vergleich dazu zeigt das Modell mit 2 Parametern eine stabilere Entwicklung der Parameter k₁ und k₂ ohne extreme anfängliche Schwankungen. Diese scheinbare Stabilität könnte jedoch darauf hindeuten, dass das Modell aufgrund seiner geringeren Komplexität nicht in der Lage ist, die tatsächlichen Verzerrungen vollständig zu erfassen und daher weniger empfindlich auf die Variabilität der Daten reagiert. Plateau Nach einer Anzahl von etwa 20 bis 30 Bildern erreichen die Modelle mit 5 und 8 Parametern, aber konvergiert mit der Zunahme von Bildern. Für die Parameter k_2 und k_3 , erreicht das Model ähnliche Werte, wie die komplexeren Modelle mit 5 und 8 Parametern. In sämtlichen Modellen ist zwischen 60 und 100 Bildern sind Schwankungen der Parameterwerte zu beobachten. Dies lässt den Schluss zu, dass die Modelle sensibel auf zusätzliche Bilder reagieren und möglicherweise noch feine Anpassungen an den Daten vornehmen, auch nachdem eine anfängliche Stabilisierung erreicht wurde. Finale Verzerrungsparameter • Das Modell mit 3 Parametern zeigt in sämtlichen Fällen die höchsten finalen Werte für k_1 (0.06550), k_2 (-0.71487) und k_3 (1.45738). Dies lässt den Schluss zu, dass eine stärkere Verzerrung kompensiert wird. • Die Modelle mit 5 bzw. 8 Parametern weisen für die finalen Werte von k_1 (-0.6399), k_2 (-0.70994) und k_3 (1.43169), wie zu erwarten war, identische Ergebnisse auf. Diese Resultate sind erwartungsgemäß konsistent, da die zusätzlichen Parameter k_4 , k_5 und k_6 im Modell mit 8 Parametern auf null gesetzt sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den verwendeten Bildern keine Verzerrungen dieser Art detektiert wurden. • Das Modell mit 2 Parametern zeigt den niedrigsten endgültigen k₁-Wert (0.04803) und k₂-Wert (-0.42255), was darauf hindeutet, dass es aufgrund seiner geringeren Komplexität möglicherweise nicht in der Lage ist, die komplexeren Verzerrungen vollständig zu erfassen und zu kompensieren. 3.2 **Tangentiale Verzerrungsparameter *p₁, p₂*** Die tangentiale Verzerrung (p1, p2) tritt auf, wenn das Objektiv und die Bildebene nicht parallel zueinander ausgerichtet sind. Die Präsenz dieser Verzerrung lässt auf eine mechanische Unregelmäßigkeit oder einen Fehler in der Montage der Kamera oder des Objektivs schließen. ¹Quelle: Mathworks Initiale Schwankungen und Stabilisierung Beide Modelle 5 und 8 zeigen anfangs eine deutliche Spitze im p₁-Wert, gefolgt von Schwankungen, die über einen längeren Zeitraum bestehen bleiben. Diese anfänglichen Schwierigkeiten haben, sich schnell zu stabilisieren. Auch nach der Einbeziehung einer größeren Anzahl von Bildern zeigt sich keine vollständige Stabilisierung der p₁-Werte. Stattdessen ist weiterhin eine gewisse Variabilität zu beobachten. Im Gegensatz zum Modell p₁ zeigen beide Modelle anfangs geringfügigere Schwankungen im p₂-Wert. Die Schwankungen im p₂-Wert. Die Schwankungen im p₂-Wert erreicht schneller eine Stabilisierung, die im weiteren Verlauf weitgehend konstant bleibt. Nach Erreichen eines Plateaus zeigt p₂ nur noch geringe Schwankungen, während p₁ auch nach vollständig stabilisiert ist und nach wie vor auf die Anzahl der Kalibrierungsbilder reagiert. Die nahezu identischen finalen Werte für p₁ und p₂ in beiden Modellen lassen den Schluss zu, dass die Modelle die tangentiale Verzerrung in gleicher Weise kompensieren. Finale Verzerrungsparameter Die finalen Werte für die Parameter p₁ und p₂ sind für beide Modelle identisch und betragen jeweils 0.00113 und -0.00018. Dies demonstriert, dass beide Modelle nach der Stabilisierung ähnliche tangentiale Verzerrungswerte liefern. Da die tangentiale Verzerrungswerte liefern. sich die Ergebnisse für p₁ und p₂ in den beiden Modellen unterscheiden würden. Dies lässt den Schluss zu, dass ein Problem mit der Kamera oder der Kalibrierung vorliegt. In []: num_images_list, all_dist_params_dict = run_dis_plot(num_params_list, all_images, objpoints, imgpoints, all_dist_labels Collecting distortion parameters... Verzerrungsparameter k1 über verschiedenen Kameramodelle 3.20e-01 2.40e-01 1.60e-01 20 80 100 Anzahl der Bilder — k1 (Parameter=2): 0.04803 — · - k1 (Parameter=5): 0.06399 Verzerrungsparameter k2 über verschiedenen Kameramodelle -1.50e+00





80

60

100

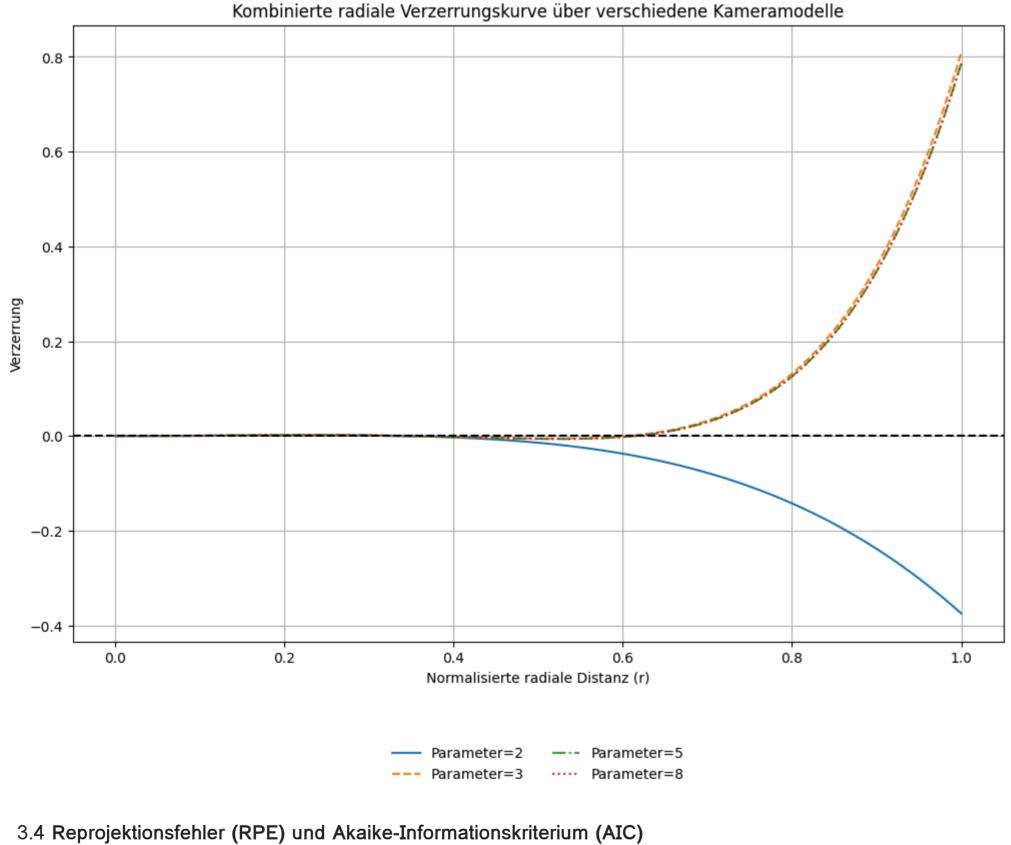
8.00e-03

6.00e-03

4.00e-03

0.00e+00

Im Gegensatz dazu zeigen die Modelle mit 3, 5 und 8 Parametern, welche alle den k3-Parameter berücksichtigen, eine positive Verzerrungskorrektur. Die genannten Modelle sind flexibel genug, auch stärkere und komplexere Verzerrungen besser zu korrigieren. run_combined_plot(all_dist_params_dict, num_params_list)



Die Legende zeigt die finalen RPE-Werte sowie die entsprechenden Akaike-Informationskriterien (AIC) für jedes Modell. Ein niedrigerer RPE/AIC kann als Indikator für eine gute Kalibrierung und Anpassungsgüte interpretiert werden.

Zu Beginn zeigen alle Modelle einen gewissen Grad an Schwankungen im Reprojektionsfehler (RPE). Dabei weist das Modell mit 2 Parametern die stärksten anfänglichen Schwankungen im RPE führt.

Initiale Schwankungen und Stabilisierung

Finale Reprojektionsfehler und AIC-Werte

Die Modelle mit 3, 5 und 8 Parametern stabilisieren sich schneller und weisen weniger ausgeprägte anfängliche Schwankungen auf. Das Modell mit 3 Parametern zeigt jedoch etwas größere Schwankungen als die Modelle mit 5 und 8 Parametern. Plateau Nach anfänglichen Schwankungen zeigen alle Modelle eine Stabilisierung. Dabei weist das Modell mit 2 Parametern tendenziell höhere RPE-Werte auf, was darauf hindeutet, dass es weniger genau ist als die komplexeren Modelle.

Das Diagramm "Reprojektionsfehler (RPE) in Abhängigkeit von der Anzahl der Kalibrierungsbilder für verschiedene Kameramodelle" zeigt auf der x-Achse die Anzahl der verwendeten Kalibrierungsbilder, während die y-Achse den Reprojektionsfehler (RPE) anzeigt.

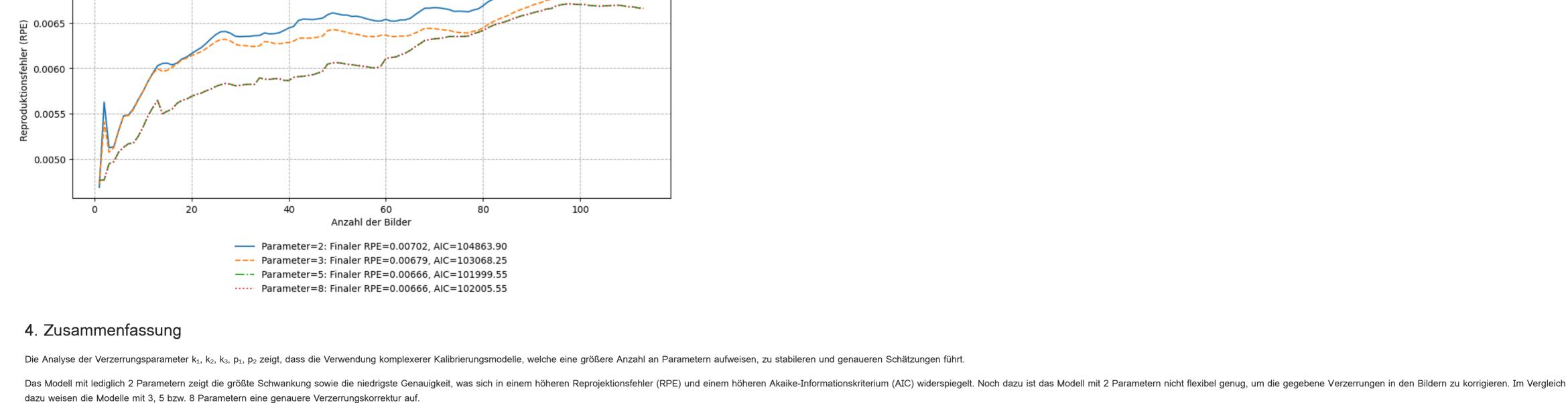
Bei einer Anzahl von 60 bis 100 Bildern zeigen die Modelle leichte Schwankungen, was darauf hindeutet, dass zusätzliche Bilder weiterhin feine Anpassungen an den Modellen vornehmen können.

• Das Modell mit 2 Parametern weist den höchsten finalen RPE-Wert von 0,00702 px sowie den höchsten AIC-Wert von 7435.14 px auf. Dies lässt auf eine geringe Genauigkeit und eine suboptimale Anpassung an die Daten schließen. Das Modell mit 2 Parametern ist nicht in der Lage, die Komplexität der Daten adäquat abzubilden, was zu einer Unteranpassung • Das Modell mit 3 Parametern weist einen niedrigeren finalen RPE-Wert von 0.00679 px sowie einen AIC-Wert von 7309.88 px auf. Dies demonstriert, dass das Modell mit 2 Parametern, jedoch noch nicht die Performance der Modelle mit 5 bzw. 8 Parametern erreicht.

• Die Modelle mit 5 und 8 Parametern zeigen identische finale RPE-Werte von 0.00666 px, jedoch unterscheiden sich ihre AIC-Wert von 7237.93 px auf, während das Modell mit acht Parametern einen AIC-Wert von 7243.93 px aufweist. Dies lässt den Schluss zu, dass das Modell mit 5 Parametern eine optimierte Balance zwischen Anpassungsgüte und Modellkomplexität aufweist

run_rpe(num_params_list, all_images, objpoints, imgpoints) RPE über verschiedene Kameraparameter

0.0070



Das Modell mit 3 Parametern zeigt eine gute Anpassung, jedoch mit geringfügig höheren Verzerrungswerten, höheren RPE-Werten und geringfügig schlechteren AIC-Werten im Vergleich zu den Modellen mit 5 und 8 Parametern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Modelle mit einer größeren Anzahl an Parametern eine präzisere Kalibrierung ermöglichen, jedoch auch mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität, während das Modell mit 5 Parametern zeigt eine Ausgewogene Kombination von Genauigkeit und Komplexität von Genauigkeit und Komplexität von Genauigkeit u 8 Parametern eine identische Reprojektionsgenauigkeit und Verzerrungskorrektur aufweist, jedoch einen geringfügig höheren AIC-Wert erlangt. Dies lässt den Schluss zu, dass das Modell mit 8 Parametern zu komplex ist und lediglich dann zusätzliche Vorteile bietet, wenn die Verzerrungsparameter k4, k5, k6 tatsächlich geschätzt werden und eine solche Verzerrung vorhanden ist.

Quellen ¹ Calib.io. "Understanding Prameter Uncertainity": https://calib.io/blogs/knowledge-base/understanding-parameter-uncertainty.

³ Mathworks "What Is Camera Caliberation?" : https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html ⁴ Scribbr. "Akaike Information Criterion (AIC)." : https://www.scribbr.com/statistics/akaike-information-criterion/ ⁵ Mathworks "What Is Camera Caliberation?" : https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html

² OpenCV Dokumentation: https://docs.opencv.org/4.x/d2/de8/group__core__array.html#ggad12cefbcb5291cf958a85b4b67b6149fa7bacbe84d400336a8f26297d8e80e3a2