

# Lineare Zeilen- und Spaltenprädiktoren zur Erkennung von Bildskalierungen

Matthias Kirchner

Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, 01062 Dresden  
matthias.kirchner@inf.tu-dresden.de

**Abstract:** Geometrische Transformationen von Bildern oder Bildteilen stellen eine wichtige Klasse von Bildmanipulationen dar. In der Literatur diskutierte bildforensische Ansätze zur Erkennung solcher Operationen basieren in der Regel auf periodischen Interpolationsartefakten, die in einem durch lineare Filterung erhaltenen Differenzsignal gemessen werden. Dieser Aufsatz beschreibt einen alternativen Ansatz zur Detektion von Skalierungen. Dabei werden periodische Artefakte unter Ausnutzung der typischen Struktur skaliertes Bilder in einer Folge von linearen Prädiktorkoeffizienten gemessen. Experimentelle Ergebnisse zeigen anhand einer großen Bilddatenbank, dass derartige Zeilen- und Spaltenprädiktoren insbesondere Bildverkleinerungen zuverlässiger erkennen können als bisherige Verfahren.

## 1 Einleitung

Digitale Bildforensik bezeichnet die Wissenschaft zur forensischen Analyse digitaler Bilddaten mit dem Ziel Aussagen zu deren Integrität und Herkunft zu machen [BFGK09]. Bedingt durch die Omnipräsenz digitaler Bilder und der damit einhergegangenen Entwicklung mächtiger Bildbearbeitungsprogramme haben bildforensische Methoden in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zahlreiche in der Literatur diskutierte Ansätze bieten inzwischen ein breites Spektrum verschiedenster Verfahren zur Erkennung von Bildmanipulationen oder zur Bestimmung des Aufnahmegerätes [SM08, Far09, u. a.]. Im Gegensatz zu kryptographischen Methoden oder digitalen Wasserzeichen ermöglicht die digitale Bildforensik eine *ex post* Perspektive auf die Analyse digitaler Bilddaten, d. h. ein unmittelbarer Zugriff auf das Originalbild oder Ursprungsgerät ist nicht erforderlich. Während dieser vermeintliche Vorteil nicht ohne Konsequenzen auf die (gerichtliche) Verwertbarkeit forensischer Indizien bleibt [Kno08, Kno09], kann andererseits nicht davon ausgegangen werden, dass in naher Zukunft Digitalkameras mit fälschungssicheren Signaturmodulen zu einem breiten Einsatz kommen. Im Gegenteil kann vermutet werden, dass die praktische Relevanz der digitalen Bildforensik weiter zunimmt, wenn es gelingt robuste und im großen Maßstab getestete [GB10] Verfahren (weiter) zu entwickeln.

Dieser Aufsatz widmet sich der Erkennung von geometrischen Bildtransformationen, genauer von Bildskalierungen. Dabei handelt es sich um eine besonders wichtige Klasse von Bildmanipulationen. So kann die Änderung der Bildgröße als eine Form plausibler Nachbearbeitung aufgefasst werden, die zunächst ohne eigentliche Auswirkung auf die

Integrität des Bildes bleibt. Dass jedoch jegliches Wissen über die Bearbeitungshistorie eines digitalen Bildes von Bedeutung sein kann, wenn es um dessen forensische Analyse geht, liegt auf der Hand. Insbesondere die Erkennung von Bildverkleinerungen ist von großem Interesse, da diese auch als eine mögliche Form des universellen Angriffs zur Vertuschung vorangegangener Bildmanipulationen betrachtet werden kann [BFGK09]. Darüber hinaus stellen geometrische Transformationen von Bildern oder Bildteilen einen wichtigen Baustein von komplexeren Bildmontagen dar, etwa beim Anpassen der Größe eines einzufügenden Bildausschnittes.

Die in der Literatur diskutierten Ansätze zur Erkennung geometrischer Bildtransformationen beruhen im Allgemeinen auf der Existenz periodischer Artefakte in interpolierten Bildern. Interpolation ist immer dann notwendig, wenn transformierte Koordinaten nicht auf dem diskreten kartesischen Bildgitter des Ausgangsbildes liegen. Wie in den grundlegenden Arbeiten von Popescu und Farid [PF05] und Gallagher [Gal05] gezeigt wurde, treten in mit linearen Basisfunktionen interpolierten Bildern periodische lineare Abhängigkeiten zwischen benachbarten Pixeln auf. Für eine Detektion dieser Artefakte kommt bei praktisch allen bekannten Verfahren explizit oder implizit eine Form von linearem Prädiktor zum Einsatz, der einzelne Abtastwerte aus deren unmittelbarer Nachbarschaft schätzt und in dessen Residuen (d. h. Schätzfehler) Interpolationspuren besonders gut messbar sind.

Das Ziel dieses Aufsatzes ist es zu zeigen, dass derartige periodische Artefakte auch in den Prädiktorgewichten selbst gemessen werden können. Dazu wird nach einem knappen Überblick über Interpolationsartefakte in skalierten Bildern im Abschnitt 2 ein geeignetes Verfahren zu deren Erkennung im Abschnitt 3 vorgeschlagen. Anhand umfangreicher Experimente wird anschließend im Abschnitt 4 dessen Eignung zur zuverlässigen Erkennung von Änderungen der Bildgröße demonstriert, bevor Abschnitt 5 den Aufsatz mit einigen zusammenfassenden Bemerkungen beschließt.

## 2 Interpolationsartefakte in geometrisch transformierten Bildern

Da in der Praxis verwendete Interpolationsbasisfunktionen in der Regel separierbar sind, beschränken sich folgende Betrachtungen zunächst auf den eindimensionalen Fall. Hier lässt sich die Interpolation eines Signals  $s$  an einer reellwertigen Position  $x \in \mathbb{R}$  als Linearkombination von Signalwerten an ganzzahligen Positionen  $\chi' \in \mathbb{Z}$  beschreiben,

$$s(x) = \sum_{\chi'=-\infty}^{\infty} h(x - \chi')s(\chi'), \quad (1)$$

wobei die Basisfunktion  $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  die zu verwendenden skalaren Gewichte bestimmt. Für eine Skalierung um einen Faktor  $1/\omega$ ,  $\omega > 0$ , ergeben sich die transformierten Koordinaten zu  $\forall \chi \in \mathbb{Z} \ x = \omega\chi$ . Für Vergrößerungen gilt  $\omega < 1$  und entsprechend für Verkleinerungen  $\omega > 1$ .

Es lässt sich leicht veranschaulichen, dass eine Skalierung um den Faktor  $1/\omega = p/q$ , mit  $p$  und  $q$  teilerfremd,  $p \perp q$ , zu periodischen Artefakten mit der Periodendauer  $p$  führt. Dazu sei angemerkt, dass die in Gl. (1) verwendeten Werte der Basisfunktion  $h$  für eine beliebige

transformierte Koordinate  $x$  ohne Einschränkung der Allgemeinheit in Abhängigkeit der Distanz  $\delta_x = x - \lfloor x \rfloor$  geschrieben werden können:

$$\sum_{\chi'=-\infty}^{\infty} h(x - \chi')s(\chi') = \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(l - \delta_x) s(\lfloor x \rfloor + l). \quad (2)$$

Aus Gl. (2) folgt, dass zwei zu interpolierende Abtastwerte  $s(x_1)$  und  $s(x_2)$  immer dann in gleicher Weise aus den jeweilig umliegenden Originalwerten berechnet werden, wenn gilt:  $\delta_{x_1} = \delta_{x_2}$ . Für skalierte diskrete Koordinaten  $x = \omega\chi$ ,  $\omega = q/p$ ,  $p \perp q$  ergibt sich aus

$$x = \frac{q}{p} \left( \frac{pm}{q} + n \right), \quad \text{mit } m \in \mathbb{Z} \text{ und } n \in \{0, 1, \dots, p-1\},$$

eine Periodizität von  $\delta_x$  mit  $p$ :

$$\delta_x = m + \frac{qn}{p} - \left\lfloor m + \frac{qn}{p} \right\rfloor = \frac{qn}{p} - \left\lfloor \frac{qn}{p} \right\rfloor.$$

Die Periodizität der Interpolationsgewichte führt dazu, dass in skalierten Signalen periodische Korrelationen zwischen benachbarten Abtastwerten auftreten. Die Ausprägung der Abhängigkeit hängt dabei im Allgemeinen von  $\delta_x$  ab. Unter der Annahme einer symmetrischen Autokorrelation im Originalsignal und einer symmetrischen Basisfunktion korreliert ein Abtastwert mit  $0 < \delta_x < 0,5$  stärker mit seinen linken Nachbarn (und umgekehrt für  $0,5 < \delta_x < 1$ ). Für  $\delta_x = 0$  und  $\delta_x = 0,5$  sind im gleichen Maße Abhängigkeiten zwischen linken und rechten Nachbarn vorhanden. Da  $\delta_x$  innerhalb einer Periode monoton steigt, lässt sich in skalierten Signalen bezüglich der Nachbarn von Abtastwerten ein entsprechender Übergang von einer linkslastigen zu einer rechtslastigen Korrelation beobachten.

Die Existenz solcher charakteristischen Abhängigkeiten wurde erstmals von Popescu und Farid [PF05] als Indiz für geometrische Transformationen diskutiert. Zur Detektion schlugen sie einen linearen Prädiktor vor, der einen Abtastwert als Linearkombination seiner Nachbarn beschreibt. Die Residuen  $e$  geben dann Aufschluss über Stärke und Ausprägung der linearen Abhängigkeit,

$$e(x) = e(\omega\chi) = s(\omega\chi) - \sum_{k=-K}^K \alpha_k s(\omega\chi + \omega k) \quad (\alpha_0 \equiv 0). \quad (3)$$

Betragsmäßig große Residuen entsprechen dabei einem geringen Grad linearer Abhängigkeit. Im Falle von interpolierten Signalen weisen die Residuen eine mehr oder weniger starke periodische Struktur auf.

Eine zentrale Frage ist hierbei die Parametrisierung des Prädiktors in Form der Koeffizienten  $\alpha$ . Für die nachfolgenden Betrachtungen ist besonders hervorzuheben, dass in Gl. (3) die gleichen Prädiktorkoeffizienten für *jeden* Abtastwert angewandt werden, was ebenso als Faltung bzw. Filterung mit einem festen Kernel interpretiert werden kann. Popescu und Farid schlagen eine, in ein Expectation/Maximization-Verfahren eingebettete, *weighted least squares* (WLS) Prozedur zur Schätzung der Koeffizienten vor. Gewählt werden die

Koeffizienten, die den gewichteten quadratischen Prädiktorfehler minimieren, wobei die Gewichte in einem iterativen Prozess bestimmt werden [PF05].

Da die Koeffizienten  $\alpha$  aus dem gesamten Signal geschätzt werden, können sie als ein Maß der *mittleren* Abhängigkeit zwischen benachbarten Abtastwerten verstanden werden. Es überrascht demnach nicht, dass in späteren Experimenten [Kir08] eine gewisse Unabhängigkeit von den tatsächlichen Transformationsparametern berichtet wurde. Gleichmaßen lässt sich in diesem Zusammenhang vermutlich die beobachtete Symmetrie der Koeffizienten ( $\alpha_k \approx \alpha_{-k}$ ) erklären.

Ein weiterer Ansatz zur Erkennung von Interpolationsartefakten liegt in der Analyse der Varianzen der (partiellen) Ableitungen von interpolierten Signalen begründet. Wie von Gallagher gezeigt [Gal05], und später von Mahdian und Saic verallgemeinert [MS08], weisen diese eine periodische Struktur auf. Da typische Implementierungen von diskreten Ableitungsoperatoren als Faltung mit einem symmetrischen Kernel beschrieben werden können, lassen sich aufschlussreiche Parallelen zu den prädiktorbasierten Ansätzen herstellen [Kir08].

Letztlich bleibt festzuhalten, dass alle bekannten Detektoren die periodischen Interpolationsartefakte in einer Form von Differenzsignal messen, welches durch Filterung des zu analysierenden Signals mit einem festen Kernel erhalten wird. Im Folgenden soll diese Herangehensweise variiert werden, indem nicht ein einzelner Prädiktor zum Einsatz kommt, sondern eine, an die typische Struktur skaliertes Bilder angelehnte, Folge von Prädiktoren. Die periodischen Artefakte werden dementsprechend nicht in den Residuen, sondern in den Prädiktorkoeffizienten selbst gemessen.

### 3 Analyse von Prädiktorkoeffizienten

Aus der Separierbarkeit typischer Basisfunktionen folgt, dass in einem skalierten Bild alle Pixel einer Zeile in gleicher Weise linear mit ihren vertikalen Nachbarn korrelieren (entsprechend für Spalten und horizontale Nachbarn).<sup>1</sup> Schreibt man die Pixel der  $i$ -ten Zeile als Vektor  $\mathbf{z}^{(i)}$ , lässt sich das folgende lineare Modell aufstellen:

$$\mathbf{z}^{(i)} - \boldsymbol{\eta}^{(i)} = \sum_{\substack{|k| \leq K \\ k \neq 0}} \alpha_k^{(i)} \left( \mathbf{z}^{(i-k)} - \boldsymbol{\eta}^{(i-k)} \right) + \boldsymbol{\epsilon}^{(i)}, \quad (4)$$

wobei  $\boldsymbol{\eta}$  Rundungsfehler bezeichnet und  $\boldsymbol{\epsilon}$  ein Fehlerterm zur Beschreibung des „Modellfehlers“ ist. Für Vergrößerungen ( $\omega < 1$ ) entfällt dieser bei einer geeigneten Wahl von  $K$ , d. h. jedes Pixel lässt sich (bis auf Rundungsfehler) vollständig als Linearkombination seiner vertikalen Nachbarn ausdrücken. Für Verkleinerungen ist dies im Allgemeinen nicht der Fall und hängt vom Support der Basisfunktion sowie dem Verkleinerungsfaktor ab.

Die zeilenabhängigen Koeffizienten  $\alpha^{(i)}$  spiegeln dabei die tatsächlich vorliegende lineare Abhängigkeit zwischen benachbarten Pixeln wider und markieren gleichzeitig den Unter-

<sup>1</sup>Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden nur Bezug auf Zeilen und deren vertikale Nachbarn genommen. Eine Übertragung auf Spalten und horizontale Nachbarn ist jedoch jederzeit problemlos möglich.

schied bei der Modellierung von Interpolationsartefakten verglichen mit bisherigen Arbeiten. Das Modell in Gl. (4) erlaubt eine explizitere Beschreibung der Interpolationsartefakte als Popescu und Farids globaler Prädiktor. Im Gegensatz zu einer impliziten Modellierung der Periodizität als Abweichung vom „mittleren“ Prädiktor erlaubt eine Folge von Zeilenprädiktoren eine Messung der periodischen Artefakte anhand der Prädiktorkoeffizienten selbst. Zur Schätzung der Koeffizienten kann dabei auf Standard-Regressionsverfahren zurückgegriffen werden, wobei pro Zeile eine entsprechende Regression durchgeführt werden muss. Eine konkrete Umsetzung soll im Folgenden diskutiert werden.

### 3.1 Idealfall: Prädiktion mit Total Least Squares

Im Falle eines vernachlässigbaren Modellfehlers,  $\epsilon^{(i)} = \mathbf{0}$ , lassen sich Pixel einer Zeile, abgesehen von Rundungsfehlern, vollständig als Linearkombination benachbarter Zeilen beschreiben. Da in Gl. (4) sowohl die abhängige Variable als auch die unabhängigen Variablen durch Rundungsfehler verfälscht sind, bietet sich eine *total least squares* (TLS) Schätzung [VV91] der Prädiktorkoeffizienten  $\alpha^{(i)}$  an.

Schreibt man Gl. (4) zu

$$\begin{aligned} \mathbf{z}^{(i)} - \boldsymbol{\eta}^{(i)} &= \left( \mathbf{Z}^{(i)} - \mathbf{N}^{(i)} \right) \cdot \boldsymbol{\alpha}^{(i)}, \\ \text{mit } \mathbf{Z}^{(i)} &= \left[ \mathbf{z}^{(i-K)}, \dots, \mathbf{z}^{(i-1)}, \mathbf{z}^{(i+1)}, \dots, \mathbf{z}^{(i+K)} \right] \\ \text{und } \mathbf{N}^{(i)} &= \left[ \boldsymbol{\eta}^{(i-K)}, \dots, \boldsymbol{\eta}^{(i-1)}, \boldsymbol{\eta}^{(i+1)}, \dots, \boldsymbol{\eta}^{(i+K)} \right], \end{aligned}$$

so findet ein TLS-Schätzer den Koeffizientenvektor  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^{(i)}$ , für den gilt:

$$\hat{\mathbf{z}}^{(i)} = \hat{\mathbf{Z}}^{(i)} \cdot \hat{\boldsymbol{\alpha}}^{(i)} \quad \text{und} \quad \left\| \left[ \mathbf{Z}^{(i)}, \mathbf{z}^{(i)} \right] - \left[ \hat{\mathbf{Z}}^{(i)}, \hat{\mathbf{z}}^{(i)} \right] \right\|_F \rightarrow \min,$$

wobei die Lösung aus der Singulärwertzerlegung (SVD) der Matrix  $\left[ \mathbf{Z}^{(i)}, \mathbf{z}^{(i)} \right]$  folgt.

Bei einer geeigneten Wahl der Nachbarschaftsgröße  $K$  erlaubt das TLS-Verfahren eine vergleichsweise genaue Schätzung der tatsächlich vorhandenen linearen Abhängigkeiten zwischen benachbarten Pixeln. Dies zeigt die Abbildung 1 für ein mit bilinearer Interpolation auf 150 % vergrößertes Bild ( $\omega = 2/3$ ) exemplarisch für eine Folge von Zeilenprädiktoren (bei einer Nachbarschaftsgröße von  $K = 3$ ). Die geschätzten Koeffizienten lassen interpolationsbedingt eine deutliche periodische Struktur erkennen und stimmen mit den theoretisch zu erwartenden (im Mittel) überein.

Obwohl die TLS-Schätzung prinzipiell zu äußerst zuverlässigen Ergebnissen führen kann, besteht im Allgemeinen das Problem, dass die Schätzung bei einem zu großen Modellfehler instabil wird. Die bei TLS gemachte Annahme der Homoskedastizität wird mit einem nicht durch lineare Abhängigkeiten erkläraren Anteil verletzt. Dies kann, wie schon angedeutet, bei Verkleinerungen leicht der Fall sein. Jedoch kann auch die falsche Wahl der Nachbarschaftsgröße zu ungenauen bzw. instabilen Schätzungen führen.<sup>2</sup> Zwar lässt

<sup>2</sup>Dazu sei angemerkt, dass die korrekte bzw. optimale Nachbarschaftsgröße in forensischen Anwendungen

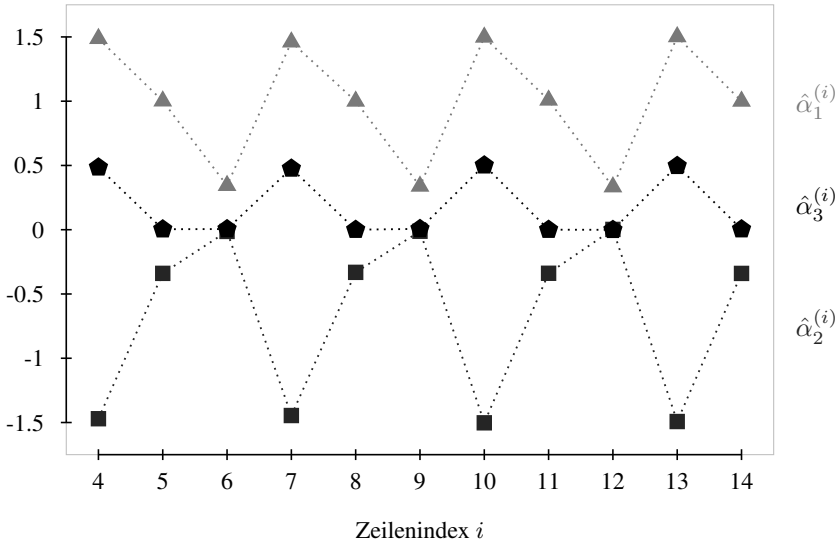


Abbildung 1: Mit TLS geschätzte Zeilenprädiktorkoeffizienten für 11 aufeinanderfolgende Zeilen eines mit bilinearer Interpolation auf 150% vergrößerten Bildes ( $K = 3$ , Bildgröße  $350 \times 350$  Pixel). Die theoretisch zu erwartenden Koeffizientenfolgen sind  $\{3/2, 1, 1/3\}$  für  $\alpha_1$ ,  $\{-3/2, -1/3, 0\}$  für  $\alpha_2$  und  $\{1/2, 0, 0\}$  für  $\alpha_3$ .

sich in einem gewissen Rahmen durch Regularisierung oder Skalierung der Fehlerterme gegensteuern [VV91], in der Praxis erwiesen sich jedoch *weighted least squares* (WLS) Schätzer als geeigneter, wenn es lediglich um eine Detektion von Bildskalierungen geht.

### 3.2 Prädiktion mit Weighted Least Squares

Wie im Abschnitt 2 diskutiert, sind interpolierte Abtastwerte je nach ihrer relativen Position  $\delta_x$  stärker mit ihren linken bzw. rechten Nachbarn korreliert. Für eine Detektion von Bildskalierungen ist es damit unter Umständen nicht zwangsläufig notwendig die exakten, durch Gl. (4) bestimmten, Koeffizienten  $\alpha^{(i)}$  zu ermitteln. Vielmehr kann es genügen den relativen Einfluss linker und rechter Nachbarn zu betrachten.

Ein vereinfachtes lineares Modell beschreibt entsprechend alle Pixel einer Zeile als Linearkombination benachbarter Zeilen, überlagert mit einem additiven Fehlerterm  $\varepsilon$ ,

$$\mathbf{z}^{(i)} = \mathbf{Z}^{(i)} \cdot \boldsymbol{\beta}^{(i)} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(i)}. \quad (5)$$

Zur Bestimmung der Koeffizienten  $\hat{\boldsymbol{\beta}}^{(i)}$  soll im Folgenden ein WLS-Schätzer verwendet werden, für den gilt:

$$\hat{\mathbf{z}}^{(i)} = \mathbf{Z}^{(i)} \cdot \hat{\boldsymbol{\beta}}^{(i)} \quad \text{und} \quad \left\| \mathbf{w}^{(i)} \left( \mathbf{z}^{(i)} - \hat{\mathbf{z}}^{(i)} \right) \right\| \rightarrow \min,$$

im Allgemeinen nicht bekannt ist.

wobei die Gewichte  $w_j^{(i)}$  aus der Varianz  $\sigma_j^2$  der umliegenden  $2K$  Nachbarn berechnet werden,  $w_j^{(i)} \propto 1/(c + \sigma_j^2)$ ,  $c > 0$ .

Die relative Abhängigkeit von linken und rechten Nachbarn lässt sich am stärksten an den Koeffizienten  $\beta_{-1}^{(i)}$  und  $\beta_1^{(i)}$  ablesen, die den beiden direkten Nachbarpixeln entsprechen. Praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Analyse der Differenzen  $d_i$ ,

$$d_i = \beta_{-1}^{(i)} - \beta_1^{(i)}, \quad (6)$$

in besonders guten Detektionsergebnissen resultiert.

Bei einer Betrachtung des Verlaufs der Prädiktorkoeffizienten (bzw. deren Differenzen) über mehrere Zeilen hinweg ist in skalierten Bildern wiederum die bekannte periodische Struktur zu erwarten. Für eine Erkennung von Bildskalierungen ist dabei die Existenz einer ausgeprägten spektralen Komponente ausschlaggebend, die im Leistungsdichtespektrum  $S(f)$  als starker Peak detektiert werden kann. Erwähnt sei, dass eine Spektralanalyse der Differenzen  $d_i$  gegenüber der direkten Untersuchung der Prädiktorkoeffizienten den Vorteil hat, eventuell störende niederfrequente Anteile zu unterdrücken. Der Einsatz von Dämpfungsfunktionen wie bei Popescu und Farid [PF05] oder Gallagher [Gal05] ist damit nicht notwendig.

Vor allem im Fall von Verkleinerungen kann jedoch nicht erwartet werden, dass die erhaltenen Schätzwerte  $\hat{\beta}^{(i)}$  eine perfekte Periodizität aufweisen. Aus diesem Grund bietet sich ein robuster Schätzer des Leistungsdichtespektrums an. Ahdesmäki et al. [ALP<sup>+</sup>05] schlagen diesbezüglich ein auf Spearman's Rangkorrelationskoeffizienten basierendes Verfahren vor, das auch im Folgenden verwendet werden soll.

Abschließend sei angemerkt, dass ein auf Zeilenprädiktoren basierender Detektor mit vergleichbar moderatem Ressourcen-Aufwand auskommt. Zwar steigt die Zahl der durchzuführenden Regressionen mit der Anzahl der Zeilen des zu analysierenden Bildes, jedoch werden pro Regression weniger Messwerte einbezogen als bei Popescu und Farids globalem Schätzer (der schnell zu hohe Speicheranforderungen für Bilder von praktischer Größe stellt). Gegenüber Detektoren auf Basis fester linearer Filter [Kir08] oder Ableitungsoperatoren [Gal05] bleibt dennoch ein stark erhöhter Rechenaufwand festzuhalten, welcher jedoch, wie im folgenden Abschnitt zu sehen sein wird, durch eine erhöhte Zuverlässigkeit ausgeglichen wird.

## 4 Experimenteller Teil

Die praktische Eignung der beschriebenen Zeilen- bzw. Spaltenprädiktoren zur Erkennung von Bildskalierungen soll anhand eines Teils der „Dresden Image Database“ [GB10] demonstriert werden. Etwa 1100 unkomprimierte Aufnahmen verschiedener Digitalkameras wurden zunächst in Graustufenbilder konvertiert und dann mit dem `convert`-Kommando von ImageMagick unter Verwendung von bilinearer Interpolation und kubischer Spline-Interpolation jeweils um verschiedene Faktoren vergrößert und verkleinert. Zur Analyse wurde anschließend jeweils ein Ausschnitt der Größe  $512 \times 512$  Pixel aus der Mitte des

skalierten Bildes herangezogen. Die Nachbarschaftsgröße der WLS-Prädiktoren betrug dabei in allen Experimenten  $K = 2$ .

Als Detektionskriterium wurde das Verhältnis  $\rho$ ,

$$\rho = \max_f S(f) / \text{median}_f S(f),$$

ausgewertet, wobei  $S(f)$  das Leistungsdichtespektrum der Koeffizientendifferenzen entsprechend Gl. (6) bezeichnet. Im Falle eines ausgeprägten Peaks im Leistungsdichtespektrum nimmt  $\rho$  hohe Werte an. Liegt  $\rho$  über einem zu definierenden Schwellwert,  $\rho > T$ , so wird das zu analysierende Bild als skaliert betrachtet. Da Interpolationsartefakte sowohl mittels Zeilen- als auch Spaltenprädiktoren detektiert werden können, wird die eigentliche Entscheidung anhand des Maximums beider Analyseergebnisse,  $\max(\rho_{\text{Zeilen}}, \rho_{\text{Spalten}})$ , getroffen.

Für einen Vergleich mit aus der Literatur bekannten Verfahren wurden die Bilder ebenfalls mit Popescu und Farids [PF05] Detektor analysiert, der gemeinhin als am zuverlässigsten betrachtet wird. Wie für die Zeilen- und Spaltenprädiktoren wurde auch hier eine Nachbarschaftsgröße von  $K = 2$  gewählt, was einem  $5 \times 5$  Fenster entspricht. Da Bildvergrößerungen im Allgemeinen als problemlos erkennbar gelten, werden im Folgenden vor allem Ergebnisse für Bildverkleinerungen diskutiert.

Die Abbildung 2 gibt anhand von ROC-Kurven für verschiedene Verkleinerungsfaktoren einen Überblick über typische Detektionsergebnisse. Dabei sind sowohl für bilineare als auch für kubische Interpolation Resultate aufgeführt. Die Falschpositiv-Raten ergeben sich aus der Analyse der unbearbeiteten Bilder im Testdatensatz.

Die bisher unübertroffene Größe des Testdatensatzes erlaubt eine knappe Reflexion der dargestellten Ergebnisse mit Bezug auf bereits aus der Literatur bekannte Resultate. So bestätigt sich im Allgemeinen die verminderte Detektierbarkeit stärkerer Verkleinerungen. Eine Ausnahme bildet die Verkleinerung auf 70 % mit bilinearer Interpolation, die weniger detektierbare Spuren zu hinterlassen scheint als beispielsweise eine Verkleinerung auf 60 %. Ein Grund könnte in der vergleichsweise langen Periodendauer der Interpolationsartefakte bei der Skalierung auf 70 % liegen. Wie zu erwarten, sind zudem bilinear interpolierte Bilder aufgrund des kleineren Supports der Basisfunktion im Allgemeinen deutlich besser detektierbar als kubisch interpolierte Bilder.

Insgesamt scheint jedoch in unserem Zusammenhang interessanter, dass die Detektion auf Basis der vorgestellten Zeilen- und Spaltenprädiktoren zu mindestens gleichwertigen, meist aber zu besseren Erkennungsleistungen führt. Dies lässt sich insbesondere aus den ROC-Kurven für Verkleinerungen mit kubischer Spline-Interpolation ablesen. Hier sind zum Teil deutliche Zuwächse bei der Detektierbarkeit zu verzeichnen. Nichtsdestotrotz erscheinen die Ergebnisse insgesamt wenig überzeugend, auch (oder gerade) im Vergleich zu aus der Literatur bekannten Ergebnissen. Dazu muss jedoch angemerkt werden, dass eine Verkleinerung mit ImageMagick stets auch in einer Nachbearbeitung des Bildes resultiert, die visuell ansprechende Ergebnisbilder zum Ziel hat und damit gleichzeitig zu einer Abschwächung der gesuchten Interpolationsartefakte führt. Dieser sonst vernachlässigte Bearbeitungsschritt mag nun einerseits als verfälschend betrachtet werden. Andererseits wurde in den durchgeführten Experimenten bewusst auf eine praktisch relevante Software



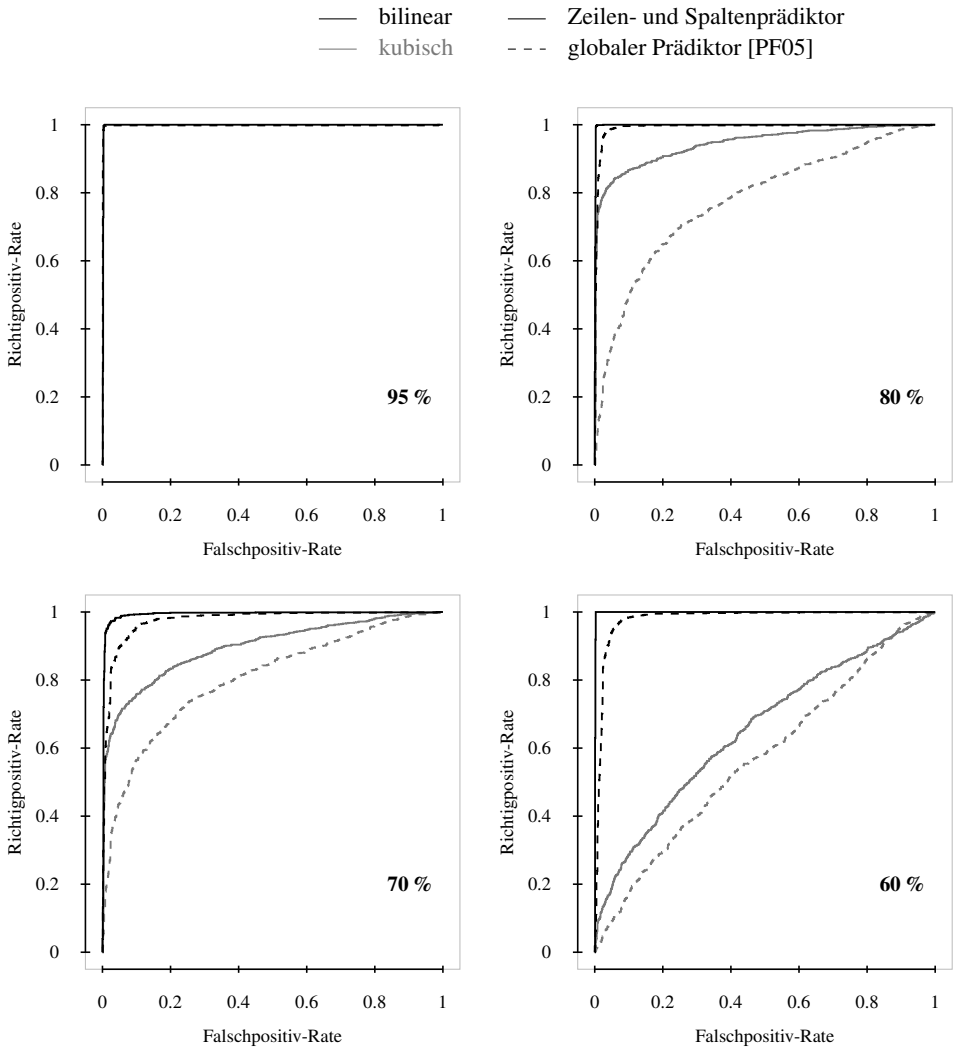


Abbildung 2: ROC-Kurven für die Erkennung von Bildverkleinerung mit bilinearer und kubischer Interpolation. Ergebnisse für die Detektion mit Zeilen- und Spaltenprädiktoren sowie Popescu und Farids [PF05] Verfahren bei einer Verkleinerung auf 95 %, 80 %, 70 % und 60 % der Originalgröße. Eine Analyse anhand von Zeilen- und Spaltenprädiktoren resultiert in jedem der Fälle in einer erhöhten Detektierbarkeit.

zurückgegriffen um möglichst realistische Aussagen zur Erkennbarkeit von Bildverkleinerungen machen zu können.

Nichtsdestotrotz unterstreichen die gezeigten Ergebnisse die prinzipielle Eignung von Zeilen- und Spaltenprädiktoren in Verbindung mit robusten spektralen Schätzern bei der Detektion von Bildskalierungen. Abschließend sei erwähnt, dass größere Nachbarschaften mit  $K > 2$  zu vergleichbaren Resultaten führten. Für  $K = 1$  musste jedoch eine im Allgemeinen weniger zuverlässige Erkennungsleistung verzeichnet werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Aufsatz widmete sich der Erkennung von Bildskalierungen als einer wichtigen Klasse von Bildmanipulationen. Während bisherige Ansätze Interpolationsartefakte in einem durch lineare Filterung erhaltenen Differenzsignal messen, wurde demonstriert, wie diese auch in einer Folge von Prädiktorkoeffizienten detektiert werden können. Dabei spielte die Beobachtung, dass in skalierten Bildern alle Pixel einer Zeile in gleicher Weise von ihren vertikalen Nachbarn abhängen, eine zentrale Rolle (und entsprechend für Spalten). Praktische Tests anhand einer großen Menge von Bildern verdeutlichten, dass eine explizite Modellierung der linearen Abhängigkeiten in skalierten Bildern einen viel versprechenden bildforensischen Ansatz darstellt.

Neben dem direkten Einsatz zur Erkennung von skalierten Bildern oder Bildteilen liegen weitere mögliche Anwendungsszenarien für die diskutierten Zeilen- und Spaltenprädiktoren auf der Hand. So soll in weiteren Untersuchungen geprüft werden, inwieweit anhand der geschätzten Prädiktorkoeffizienten zwischen Bildvergrößerungen und Bildverkleinerungen unterschieden werden kann. Es ist bekannt, dass verschiedene Transformationsparameter zu vergleichbaren periodischen Artefakten im Residuum eines globalen Prädiktors führen können [PF05, Kir08]. Eine Unterscheidung nur anhand der Position ausgeprägter Peaks ist damit nicht möglich. Gleichzeitig ist jedoch zu erwarten, dass unterschiedliche Skalierungsfaktoren in abweichenden Koeffizienten bei der Prädiktion einzelner Zeilen und Spalten resultieren. Eine weitere mögliche Anwendung liegt in der Steganalyse von skalierten Bildern. Hier können zeilen- und spaltenabhängige Prädiktoren unter Umständen bei einer verbesserten Abschätzung des Stegorauschens unterstützen, z. B. [KB08].

Ein Einschränkung des beschriebenen Ansatzes liegt darin, dass eine Verallgemeinerung auf beliebige geometrische Transformationen (etwa der Rotation) schwer oder möglicherweise gar nicht möglich ist. Jedoch stellen Skalierungen, und insbesondere Bildverkleinerungen, den vermutlich wichtigsten Fall von geometrischen Transformationen dar.<sup>3</sup> Bestehen bleibt somit indes die Problematik der zuverlässigen Erkennung starker Bildverkleinerungen bei dem Einsatz von Basisfunktionen jenseits der bilinearen Interpolation. Wie auch die hier gezeigten Ergebnisse trotz sichtlicher Verbesserungen deutlich machen, liegen die erreichbaren Erkennungsraten noch weit von einer praktischen Nützlichkeit entfernt. Es ist eine offene Frage, inwieweit auf periodische Artefakte abzielende Detektoren

<sup>3</sup>Zudem lässt sich die Rotation eines Bildes äußerst zuverlässig mit effizienten Detektoren feststellen [Kir08].

diesbezüglich einen akzeptablen Stand erreichen können, oder letztlich nur eine Kombination einer Vielzahl von Merkmalen zum Erfolg führt.

## Literatur

- [ALP<sup>+</sup>05] Miika Ahdesmäki, Harri Lähdesmäki, Ron Pearson, Heikki Huttunen und Olli Yli-Harja. Robust Detection of Periodic Time Series Measured from Biological Systems. *BMC Bioinformatics*, 6(117), 2005.
- [BFGK09] Rainer Böhme, Felix Freiling, Thomas Gloe und Matthias Kirchner. Multimedia Forensics is not Computer Forensics. In Zeno J. Geradts, Katrin Y. Franke und Cor. J. Veenman, Hrsg., *Computational Forensics, Third International Workshop, IWCF 2009*, LNCS 5718, Seiten 90–103, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Verlag.
- [Far09] Hany Farid. Image Forgery Detection. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(2):16–25, 2009.
- [Gal05] Andrew C. Gallagher. Detection of Linear and Cubic Interpolation in JPEG Compressed Images. In *Proceedings of the Second Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, Seiten 65–72, 2005.
- [GB10] Thomas Gloe und Rainer Böhme. The Dresden Image Database for Benchmarking Digital Image Forensics. In *Proceedings of the 25th Symposium on Applied Computing (ACM SAC 2010)*, Seiten 1585–1591, 2010.
- [KB08] Andrew D. Ker und Rainer Böhme. Revisiting Weighted Stego-Image Steganalysis. In Edward J. Delp, Ping Wah Wong, Jana Dittmann und Nasir Memon, Hrsg., *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging: Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X*, 681905, 2008.
- [Kir08] Matthias Kirchner. Fast and Reliable Resampling Detection by Spectral Analysis of Fixed Linear Predictor Residue. In *MM&Sec'08, Proceedings of the Multimedia and Security Workshop 2008*, Seiten 11–20, New York, NY, USA, 2008. ACM Press.
- [Kno08] Michael Knopp. Digitalfotos als Beweismittel. *Zeitschrift für Rechtspolitik*, 41(5):156–158, 2008.
- [Kno09] Michael Knopp. Rechtliche Perspektiven zur Digitalen Beweisführung. In Stefan Fischer, Erik Maehle und Rüdiger Reischuk, Hrsg., *Informatik 2009*, LNI 154, Seiten 1552–1566. Gesellschaft für Informatik, 2009.
- [MS08] Babak Mahdian und Stanislav Saic. Blind authentication using periodic properties of interpolation. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 3(3):529–538, 2008.
- [PF05] Alin C. Popescu und Hany Farid. Exposing Digital Forgeries by Detecting Traces of Re-sampling. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(2):758–767, 2005.
- [SM08] Husrev T. Sencar und Nasir Memon. Overview of State-of-the-art in Digital Image Forensics. In Bhargab B. Bhattacharya, Susmita Sur-Kolay, Subhas C. Nandy und Aditya Bagchi, Hrsg., *Algorithms, Architectures and Information Systems Security*, Kapitel 15, Seiten 325–348. World Scientific Press, 2008.
- [VV91] Sabine Van Huffel und Joos Vandewalle. *The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1991.

