# Robustheit und Sicherheit Wavelet-basierter Watermarking-Algorithmen

Peter Meerwald und Andreas Uhl

Department of Scientific Computing, Universität Salzburg, Jakob-Haringer-Str. 2, A-5020 Salzburg, Österreich
{pmeerw, uhl}@cosy.sbg.ac.at

**Zusammenfassung** In diesem Artikel betrachten wir den Stand der Entwicklung Wavelet-basierter Watermarking-Algorithmen. Dabei konzentrieren wir uns auf Verfahren zum Schutz des Urheberrechts bzw. zur Prüfung der Integrität und Authentizität von digitalen Bilddaten. Nachdem wir die Vorteile von Wasserzeichen im Wavelet-Transformationsbereich identifiziert haben, untersuchen wir, ob sich tatsächlich eine höhere Robustheit, insbesondere gegenüber JPEG2000, erzielen läßt.

## 1 Einführung

Mit der fortschreitenden Standardisierung von JPEG2000[1] als Ersatz für das auf die diskrete Cosinus-Transformation beruhende JPEG-Verfahren wird in den kommenden Jahren ein Wavelet-basiertes Kompressionsverfahren weite Verbreitung finden. Den gesteigerten Anforderungen von heute wie progressive Übertragung und Skalierbarkeit kann das in den achtziger Jahren entwickelte JPEG nicht – oder nur mehr bedingt – gerecht werden. Mittlerweile läßt die verfügbare Rechenleistung auf den meisten Arbeitsplätzen auch wesentlich aufwendigere Kodierschemen und damit höhere Kompressionsraten zu.

Durch die rasante Entwicklung der Übertragungs- und Speicherkapazität und nicht zuletzt durch das Wachstum des Internets, wurde es aber auch notwendig, Verfahren zu entwickeln, die den Schutz des Urheberrechtes digitaler Medien ermöglichen bzw. die Integrität und Authentizität der Inhalte sicherstellen. Digitale Wasserzeichen (Watermarks) sind Signale, die für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar in Bilddaten eingebettet werden. Mittels geeigneter Programme ist es möglich, die versteckte Information auszulesen und zur Feststellung des Urhebers (watermarking for copy protection) oder des rechtmäßigen Käufers eines digitalen Bildes zu verwenden (watermarking for circulation tracking) – dazu ist eine darüberliegende Sicherheitsinfrastruktur erforderlich. Für einige Anwendungen wie dem Schutz der Bilder einer digitalen Bibliothek können auch sichtbare Wasserzeichen verwendet werden, geeignete Verfahren beschreibt etwa Braudaway [2]. Die Anforderungen an sichtbare Wasserzeichen unterscheiden sich wesentlich von den hier behandelten nicht wahrnehmbaren Watermarks, weshalb wir nicht weiter auf sie eingehen wollen.

[1] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 (JPEG working group)

Grundsätzlich ist ein Wasserzeichen unabhängig vom Dateiformat oder dem Kompressionsschema, da das Wasserzeichen direkt in das Bildsignal eingebunden ist (spread-spectrum communication). Trotzdem kann es von Vorteil sein, das Kompressionsverfahren zu kennen. Die zu erwartenden Störungen, die bei einer verlustbehaftete Kompression auftreten, können bei der Einbettung des Watermarks vorweg genommen werden bzw. bei der Erkennung berücksichtigt werden. Diese zusätzliche Information führt im allgemeinen zu robusteren Wasserzeichen. Aus diesem Grund ist es wichtig, Wavelet-basierte Kompressionsverfahren zu untersuchen und geeignete Watermarking-Algorithmen zu entwickeln.

### 1.1 Einteilung der Verfahren

Die bisher in der Literatur beschriebenen Wavelet-basierenden Verfahren (siehe auch Tabelle 1) lassen sich im wesentlichen nach dem Anwendungsgebiet (Urheberschutz oder Integritätsprüfung), der optionalen Verwendung des Originalbild zur Rekonstruktion des Watermarks und der Art des Wasserzeichens einteilen. Watermarks für den Urheberrechtsschutz müssen sowohl robust gegenüber typischen Bildbearbeitungsoperationen wie Skalieren der Größe, Verändern des Kontrasts und Kompression sein, als auch genügend Kapazität zur Identifizierung des Urhebers bieten – zum Beispiel durch Einbettung einer 64-Bit-Zahl, wie es der ISO Standard 10918 ('Multimedia License Plate') vorsieht. Die Verfahren zum Nachweis der Unverfälschtheit hingegen müssen sicher sein und sollten die Art der durchgeführten Manipulation aufdecken können.

Die Verwendung des Originalbildes zur Rekonstruktion des Wasserzeichens erhöht die Robustheit eines Verfahrens wesentlich, bringt aber auch das Problem der Umkehrbarkeit mit sich, wie Craver [9] gezeigt hat. Für viele Anwendungen ist es praktikabel, auf das Originalbild verzichtet zu können (blind detection/reconstruction).

Die Information eines Wasserzeichens besteht entweder aus einer beliebigen Folge von Bits oder aus einer pseudo-zufälligen Folge von Zahlen, die um 0 normal verteilt sind[2]. Auf die Verfahren zur Einbettung eines kleinen Bildes (etwa das Logo des Urhebers), vorgestellt etwa in [16] und [4], wird hier nicht weiter eingegangen, da in diesem Fall die Erkennung des Wasserzeichens nicht auf einem statistischen Test beruht, sondern die Fähigkeit des menschlichen Auges für die Rekonstruktion ausschlaggebend ist. Ebenso betrachten wir hier keine Verfahren, die nur das Vorhandensein eines Watermarks feststellen können – dazu zählen etwa Algorithmen, wie sie in [11] und [1] beschrieben werden.

In Abschnitt 2 werden wir auf einige für das sichere und robuste Einbetten von Wasserzeichen wichtige Vorteile der diskreten Wavelet-Transformation (DWT) gegenüber der DCT eingehen und einen Überblick über einige Watermarking-Verfahren geben. Resultate zur Robustheit insbesondere gegenüber JPEG und einigen DWT-basierten Kompressionsalgorithmen finden sich in Abschnitt 3. Abschließend geben wir einen Ausblick auf die künftige Entwicklung Wavelet-basierter Watermarking-Verfahren.

[2] Herrigel beschreibt in [13] ein Verfahren, wie beliebige Symbole als Folge von Zahlen mit den gewünschten Eigenschaften kodiert werden können.

**Tabelle 1.** Einteilung Wavelet-basierter Watermarking-Algorithmen

| Algorithmus | Anwendungsgebiet | Originalbild erforderlich | Binäres Watermark | Einbettung in ... |
|---|---|---|---|---|
| Chu [6] | Urheberschutz | Nein | Ja | Bildbereich |
| Corvi [7] | Urheberschutz | Ja | Nein | $LL_n$ |
| Inoue [14] | Urheberschutz | Ja/Nein | Ja | $HL_3$, $LH_3$ zerotree |
| Kundur [17] | Urheberschutz | Nein | Ja | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Kundur [18] | Integritätsprüfung | Nein | Ja | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Ohnishi [23] | Urheberschutz | Nein | Ja | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Pereira [24] | Urheberschutz | Nein | Ja | $LL_1$ |
| Wang [29] | Urheberschutz | Ja/Nein | Nein | nicht $LL_n$ |
| Wolfgang [31] | Urheberschutz | Ja | Nein | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Xia [32] | Urheberschutz | Ja | Nein | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Xie [33] | Integritätsprüfung | Nein | Ja | $LL_n$ |
| Zeng [34] | Urheberschutz | Ja | Nein | $HL_i, LH_i, HH_i$ |
| Zhu [35] | Urheberschutz | Ja | Nein | $HL_i, LH_i, HH_i$ |

## 2 Wasserzeichen im Wavelet-Bereich

Aufbauend auf die Arbeit von Cox [8] hat man in den letzten Jahren festgestellt, daß Wasserzeichen, die in den Transformationsbereich (DCT, DFT, ...) eines Bildes eingebettet werden, oft robuster sind als solche, die direkt im Bildbereich kodiert werden. Das zeigen auch klar unsere Ergebnisse im Abschnitt 3.

Eines der ersten Watermarking-Verfahren im Wavelet-Transformationsbereich beschreibt Corvi [7]. Anstatt der DCT-Koeffizienten wie in Cox's Algorithmus werden dabei einfach die Koeffizienten im Näherungsbild (LL) der zweidimensionalen diskreten Wavelet-Transformation mit der Watermark-Information versehen. Die Vorteile und Möglichkeiten, die die pyramidale Wavelet-Zerlegung (siehe Abbildung 1) eines Bildes bietet, werden dadurch allerdings nicht genutzt.

Angelehnt an die von Cox beschriebene Methode zum Einbetten von Wasserzeichen in Form einer Folge normalverteilter Zahlen wurde eine ganze Reihe von Verfahren entwickelt, zu denen auch die Algorithmen von Xia [32], Zhu [35] und Wang [29] zu zählen sind. Anders als für das Wasserzeichen von Corvi, werden hier ausschließlich die Detail-Subbänder ($HL_n$, $LH_n$, $HH_n$) benutzt. Während Xia und Zhu alle Stufen der Wavelet-Zerlegung zum Kodieren des Watermarks verwendet, wählt Wang nur signifikante Subbänder und verwendet dazu ein Modell, das auch dem MTWC-Kompressionsschema [28] des selben Autors zu Grunde liegt.

Eine andere Gruppe von Wavelet-basierten Watermarking-Algorithmen nutzt die Quantisierung einzelner Koeffizienten zur Einbettung eines Bits ähnlich des von Koch [15] beschriebenen Schemas für den DCT-Bereich. Hierzu gehören die von Ohnishi [23] und Kundur [17] präsentierten Verfahren, die beide ausschließlich Koeffizienten der Detail-Subbänder in Beziehung setzen. Ähnlich funktionieren die Methoden von Xie [33] bzw. Pereira [24], die allerdings Koeffizienten des Näherungsbildes ($LL$) verwendet. Um geeignete Koeffizienten für das Verfahren von Xie auszuwählen und damit die Robustheit erhöhen zu können, wird hierbei auf den von Said [25] entwickelten SPIHT Algorithmus zurückgegriffen. Das von Inoue [14] beschriebene Verfahren nutzt die von Shapiro [26] eingeführten 'zerotrees' um zwischen signifikanten und nicht signifikanten Koeffizienten unterscheiden zu können. Die zwei vorgestellten Varianten des Algorithmus verwenden einmal die signifikanten, einmal die nicht signifikanten Koeffizienten, um die Watermark-Information zu kodieren. Der Ansatz von Kutter [21] zur Einbettung eines Wasserzeichens im Bildbereich wird von Chu [6] durch eine Quantisierung im Wavelet-Bereich erweitert, um die Auswirkungen Wavelet-basierter Kompressionsschemen vorwegzunehmen. Wolfgang [31] zeigt, daß ein für den DCT-Bereich entwickelter Algorithmus auch im Wavelet-Bereich gute Ergebnisse liefert und Zeng [34] schlägt das Verfahren für den JPEG2000 Standard vor[3].

Eine gute Einführung in die Problematik der Bild-Authentifizierung und Integritätsprüfung mit zahlreichen Literaturhinweisen gibt Lin[4]. Interessanterweise stellen wir fest, daß die zwei von uns betrachteten Wavelet-basierten Verfahren, Xie [33] und Kundur [18], sich in bezug auf die Einbettung des Wasserzeichens nicht wesentlich von den Methoden des Urheberrechtsschutzs unterscheiden.

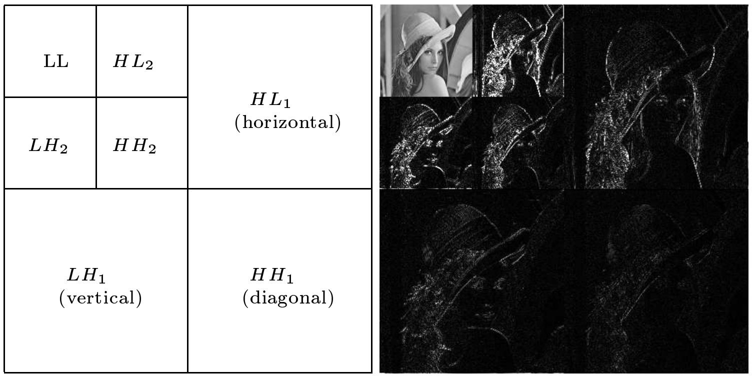



**Abbildung 1.** Pyramidale 2-Stufen-Zerlegung des Graustufenbildes 'Lena'

### 2.1 Vorteile des Wavelet-Transformationsbereiches

Der nächste Standard zur Kompression digitaler Bilder, JPEG2000, wird auf die diskrete Wavelet-Transformation aufbauen. Durch den Wechsel des Transformationsbereiches können neu hinzugekommene Anforderungen wie die progressive Übertragung (in zweifacher Hinsicht: entweder bis zur gewünschten Auflösung oder bis zur geforderten Bildqualität), die Anpassung an wechselnde Bandbreitenverhältnisse (etwa bei Übertragung in GSM-Netzen oder über das Internet) leichter erfüllt werden [5]. Aber auch der Schutz des Urheberrechts durch Wasserzeichen soll bei der Entwicklung des Standards berücksichtigt werden[5]. Geeig-

[3] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N759

[4] siehe `http://www.ctr.columbia.edu/~cylin/auth/mmauth.html`

[5] 'Seminar on imaging security and JPEG2000', Juli 1999; die Arbeiten sind unter `http://eurostill.epfl.ch/~ebrahimi/JPEG2000.htm` verfügbar.

nete Watermarking-Verfahren können in gleichem Maße von den Eigenschaften der Wavelet-Transformation profitieren. Zu den Vorteilen gehören nach Xia [32]:

- Der hierarchische Aufbau der Zerlegung und Multiresolution-Eigenschaft. Durch den geschachtelten Aufbau der Wavelet-Zerlegung kann ein Wasserzeichen eventuell schon nach Berechnung weniger Stufen erkannt werden, was Rechenzeit – speziell bei Videoanwendungen – sparen kann. Im Gegensatz zur DCT ermöglicht die DWT auf natürliche Weise progressive Übertragung, was auch im vorliegenden JPEG2000-Entwurf in den vielfältigen Skalierungsmöglichkeiten Niederschlag findet.
- Die Lokalität der DWT-Koeffizienten. Die Änderung eines DWT-Koeffizienten wirkt sich nicht wie bei der DCT global auf das gesamte Bild aus, sondern beeinflußt nur die Bilddaten in einem kleinen Bereich, abhängig von der Länge des verwendeten Zerlegungsfilters. Dadurch werden lokale Wasserzeichen möglich, die verwendet werden können, um nur ausgewählte Bildbereiche (region-of-interest, ROI) zu kennzeichnen; eine Anwendung dieser Eigenschaft beschreibt Su [27].
- Die Ähnlichkeit der Arbeitsweise des menschlichen Auges und der dyadischen Frequenz-Zerlegung durch die Wavelet-Analyse [10]. Die Struktur der Zerlegung erlaubt es, Schwächen des Sehapparates auszunutzen, um Wasserzeichen unsichtbar einzubetten. So ist das Auge weniger empfindlich gegenüber kleinen Änderungen im Bereich von Kanten oder Texturen als in glatten Flächen eines Bildes. Kanten- und Texturinformation wird größtenteils durch die Detail-Subbänder ($HL$, $LH$, $HH$) repräsentiert.
  An dieser Stelle sei auf die 'duale Beziehung' zwischen Kompressions- und Watermarking-Verfahren verwiesen [19], da beide auf die Wahrnehmbarkeit von Quantisierungsfehler bzw. Fehler durch das zusätzliche Watermark-Signal Bezug nehmen müssen. Nicht geklärt ist bisher, ob die Übereinstimmung der Transformationsbereiche für Watermarking und Kompression eine höhere Robustheit des Wasserzeichens nach sich zieht. Wolfgang [30] bzw. Zeng [34] erwarten höhere Robustheit durch Übereinstimmung der Transformationsbereiche – im Gegensatz zu Kundur [19], die bessere Ergebnisse durch Verwendung verschiedener Transformationen und eines Referenzwasserzeichens [20] erzielt.
- Die Möglichkeit der effizienten DWT-Implementierung. Einige DCT-gestützte Watermarking-Verfahren verlangen die Transformation großer Bildblöcke (bzw. des gesamten Bildes), was durch die Komplexität der DCT zu langen Rechenzeiten führt. Die DWT begnügt sich hingegen mit linearen Aufwand und kann somit problemlos auch auf große Bilder angewandt werden.

## 3 Ergebnisse und Ausblick

Um Aussagen über die Robustheit von Watermarking-Algorithmen gegenüber verlustbehafteter Kompression machen zu können, betrachten wir die Auswirkung der Bildveränderung auf die Korrelation zwischen dem originalen und dem extrahierten Wasserzeichen. Dazu wurden mit verschiedenen Watermarking-Algorithmen Wasserzeichen in das bekannte Graustufenbild 'Lena' ($512 \times 512$ Pixel) eingebettet. Die Wahl der Parameter erfolgte so, daß das Wasserzeichen mit freiem Auge nicht wahrgenommen werden kann.

Untersucht wurde die Auswirkung der Kompression auf das eingebettete Wasserzeichen mittels JPEG, SPIHT [25] und JPEG2000[6] bei verschiedenen Kompressionsraten. Durch geeignete Wahl der Kompressions-Parameter liegt die erzielte Kompressionsrate zwischen 1:4 und 1:32 bei JPEG, zwischen 1:4 und 1:80 bei SPIHT und zwischen 1:4 und 1:100 bei JPEG2000. Tabelle 2 gibt darüber hinaus Auskunft über die PSNR des Originalbildes gegenüber dem komprimierten Bild.

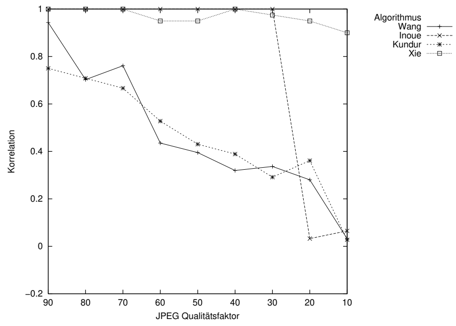
**Tabelle 2.** PSNR der getesteten Kompressionsalgorithmen bei verschiedenen Kompressionsraten

| Kompression | Rate | PSNR | Rate | PSNR |
|---|---|---|---|---|
| JPEG | 1:4 | 40.78 | 1:32 | 30.40 |
| SPIHT | 1:4 | 45.07 | 1:80 | 30.22 |
| JPEG2000 | 1:4 | 43.91 | 1:100 | 29.20 |

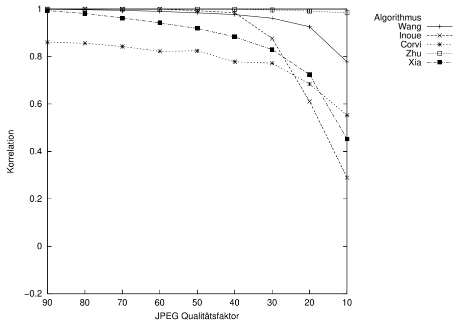
Über die Korrelation von Wasserzeichen, die im Wavelet-Transformationsbereich eingebettet wurden und ohne Zuhilfenahme des Originalbildes nach der Kompression rekonstruiert werden müssen, gibt die linke Spalte von Abbildung 2 Auskunft. Es zeigt sich, daß das Verfahren von Xie zur Einbettung eines Watermarks überaus robust ist gegenüber allen Kompressions-Angriffen. Dies wird durch Einbetten des Wasserzeichens in alle Koeffizienten des Näherungsbildes erreicht. Allerdings leidet darunter die Sicherheit, da keine Stellen schlüsselabhängig "übersprungen" werden wie etwa im Verfahren von Kundur. Das Verfahren von Inoue zeigt Synchronisationsprobleme beim Auslesen des Wasserzeichens ohne Referenzbild und fällt deshalb plötzlich stark ab.

Generell sind die Wavelet-basierten Watermarking-Verfahren, die auf das Originalbild zurückgreifen können, robuster, wie die rechte Spalte von Abbildung 2 deutlich veranschaulicht. Hier zeichnen sich alle Algorithmen mit Ausnahme von Inoues durch sehr gute Robustheit gegenüber Kompression aus. Durch Ausnutzen der Multiresolution-Eigenschaft der Wavelet-Zerlegung und den überlappenden, redundanten Aufbau des Wasserzeichens schneidet Zhus Methode am besten ab. Unter Verwendung des Originalbildes erzielt auch Wangs Algorithmus sehr gute Resultate und stellt eine echte Verbesserung gegenüber dem DCT-basierten Verfahren von Cox dar. Da die Algorithmen gleich vorgehen und beide im Prinzip versuchen, die für die Wahrnehmung signifikantesten Koeffizieten zu verändern, kann dieser Gewinn klar dem Modell der Wavelet-Transformation zugerechnet werden. Keiner der getesteten Algorithmen im DCT-Bereich kommt an die Robustheit der Wavelet-basierten Verfahren heran, insbesondere bei hohen Kompressionsraten. Zusätzlich zu den bekannten Algorithmen von Cox und Koch

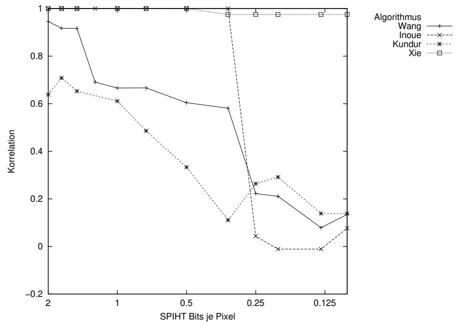
[6] ISO/IEC CD15444-1; für unsere Experimente wurde JasPer 0.010 verwendet, verfügbar auf `http://spmg.ece.ubc.ca/people/mdadams/jasper/index.html`



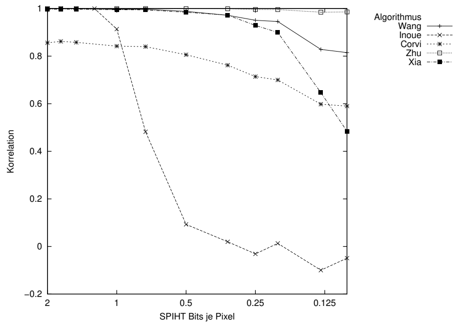

(a) JPEG



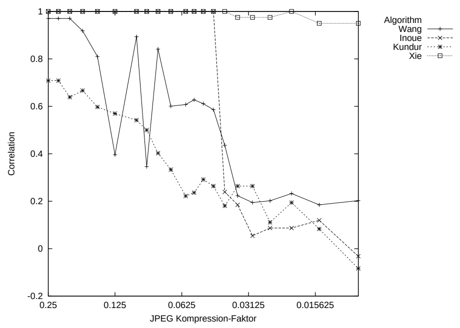

(b) JPEG



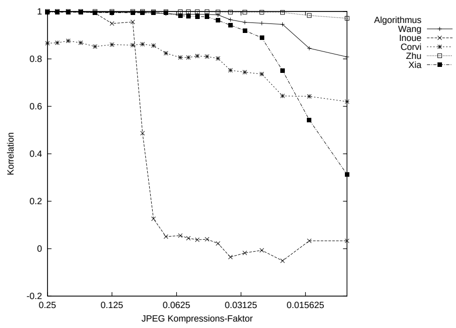

(c) SPIHT




(d) SPIHT

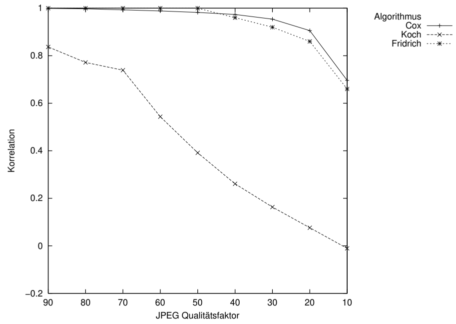



(e) JPEG2000

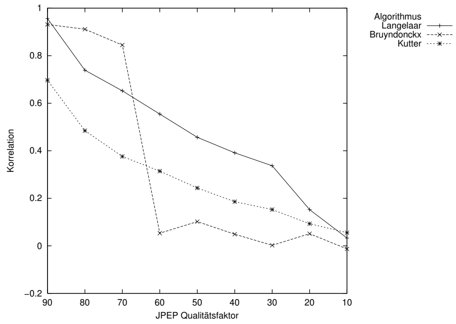



(f) JPEG2000

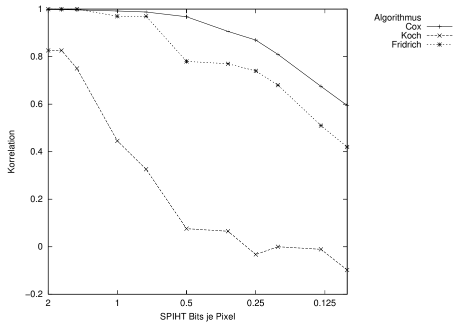
**Abbildung 2.** Korrelation der Wasserzeichen im Wavelet-Bereich nach Kompression des Bildes; in der linken Spalte die Watermarking-Verfahren ohne Zuhilfenahme des Originalbildes, in der rechten Spalte die Algorithmen, die das Originalbild verwenden



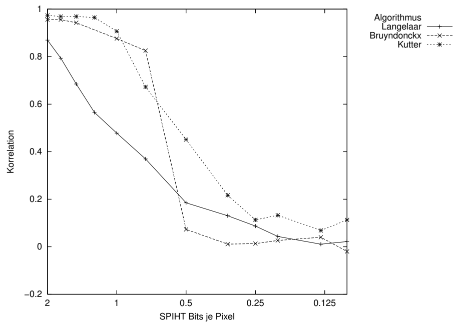

(a) JPEG



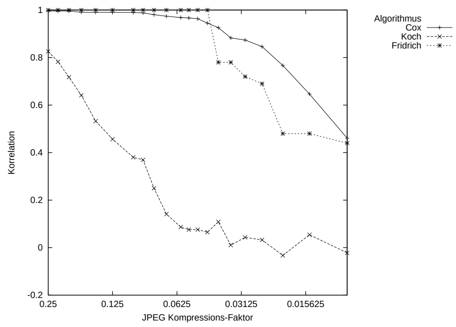

(b) JPEG



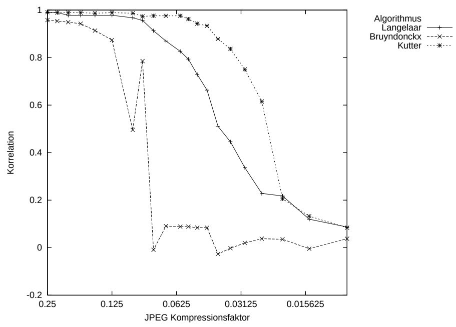

(c) SPIHT




(d) SPIHT




(e) JPEG2000




(f) JPEG2000

**Abbildung 3.** Korrelation der Wasserzeichen im DCT-Bereich (linke Spalte) bzw. Bild-Bereich (rechte Spalte); jeweils nach Kompression des Bildes mit JPEG, SPIHT und JPEG2000 haben wir auch eine Variante von Fridrich [12] getestet, die DCT-Koeffizieten des mittleren Frequenzbereichs verwendet.

Mit dem robusten Einbetten eines Wasserzeichens im Transformationsbereich können die Ansätze, die im Bildbereich arbeiten, nicht mithalten, wie die rechte Spalte von Abbildung 3 zeigt. Wir haben die Verfahren von Bruyndonckx [3], Langelaar [22] und Kutter [21] zum Vergleich herangezogen, die allesamt ohne Originalbild auskommen. Die Methode von Langelaar nimmt die JPEG-Kompression vorweg und ist deshalb bei diesem Test besonders robust.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß der Wavelet-Transformationsbereich gute Voraussetzungen mitbringt, um robuste Wasserzeichen, vor allem im Hinblick auf JPEG2000, einzubetten.

## Literatur


1. M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, A. Lippi, A. Piva. A DWT-based technique for spatio-frequency masking of digital signatures. In *Proc. of SPIE, EI '99*, vol. 3657, San Jose, USA, January 1999.
2. G. W. Braudaway, K. A. Magerlein, F. C. Mintzer. Protecting publicly-available images with a visible image watermark. In *Proc. of SPIE*, vol. 2659, p. 126–133, San Jose, USA, February 1996.
3. O. Bruyndonckx, J.-J. Quisquater, B. M. Macq. Spatial method for copyright labeling of digital images. In *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing '95, Thessaloniki, Greece*, p. 456–459, 1995.
4. J. J. Chae, D. Mukherjee, B. S. Manjunath. A robust embedded data from wavelet coefficients. In *Proc. of SPIE, EI '98*, vol. 3312, p. 308–317, San Jose, USA, 1998.
5. M. Charrier, D. S. Cruz, M. Larsson. JPEG2000, the next millennium compression standard for still images. In *Proc. of ICMCS '99*, p. 131–132, Florence, Italy, 1999.
6. C.-J. H. Chu, A. W. Wiltz. Luminance channel modulated watermarking of digital images. In *Proc. of SPIE*, p. 437–445, Orlando, USA, April 1999.
7. M. Corvi, G. Nicchiotti. Wavelet-based image watermarking for copyright protection. In *Scand. Conf. on Image Analysis '97*, Lappeenranta, Finland, June 1997.
8. I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, T. G. Shamoon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. In *Proc. of ICIP '97*, vol. 6, p. 1673–1687, Santa Barbara, USA, October 1997.
9. S. Craver, N. Memon, B.-L. Yeo, M. M. Yeung. On the invertability of invisible watermarking techniques. In *Proc. of ICIP '97*, vol. 1, p. 540, Santa Barbara, USA, October 1997.
10. S. Daly, W. Zeng, J. Li, S. Lei. Visual masking in wavelet compression for JPEG2000. In *Proc. of SPIE, EI '00*, vol. 3971, San Jose, USA, January 2000.
11. R. Dugad, K. Ratakonda, N. Ahuja. A new wavelet-based scheme for watermarking images. In *Proc. of ICIP '98*, Chicago, USA, October 1998.
12. J. Fridrich. Combining low-frequency and spread spectrum watermarking. In *Proc. of SPIE*, San Diego, USA, July 1998.
13. A. Herrigel, J. J. K. O'Ruanaidh, H. Petersen, S. Pereira, T. Pun. Secure copyright protection techniques for digital images. In *Information hiding: second international workshop*, p. 169–190, Portland, USA, April 1998.
14. H. Inoue, A. Miyazaki, A. Yamamoto, T. Katsura. A digital watermark based on the wavelet transform and its robustness on image compression. In *Proc. of ICIP '98*, Chicago, USA, 1998.

15. E. Koch, J. Zhao. Towards robust and hidden image copyright labeling. In *Proc. of IEEE Int. Workshop on Nonlinear Signal and Image Proc.*, p. 452–455, Marmaras, Greece, June 1995.
16. D. Kundur, D. Hatzinakos. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion. In *Proc. of ICIP '97*, p. 544–547, Santa Barbara, USA, October 1997.
17. D. Kundur, D. Hatzinakos. Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition. In *Proc. of ICASSP '98*, vol. 5, p. 2969–2972, Seattle, USA, May 1998.
18. D. Kundur, D. Hatzinakos. Digital watermarking for telltale tamper-proofing and authentication. In *Proc. of IEEE: Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information*, vol. 87, p. 1167–1180, July 1999.
19. D. Kundur, D. Hatzinakos. Mismatching perceptual models for effective watermarking in the presence of compression. In *Proc. of SPIE*, vol. 3845, Boston, USA, September 1999.
20. D. Kundur, D. Hatzinakos. Attack characterization for effective watermarking. In *Proc. of ICIP '99*, Kobe, Japan, October 1999.
21. M. Kutter, F. Jordan, F. Bossen. Digital signature of color images using amplitude modulation. In *Proc. of SPIE*, vol. 2952, p. 518–526, San Jose, USA, 1997.
22. G. C. Langelaar, R. L. Lagendijk, J. Biemond. Robust labeling methods for copy protection of images. In *Proc. of SPIE*, vol. 3022, San Jose, USA, 1997.
23. J. Ohnishi, K. Matsui. Embedding a seal into a picture under orthogonal wavelet transform. In *Proc. of ICMCS '96*, p. 514–521, Hiroshima, Japan, June 1996.
24. S. Pereira, S. Voloshynovskiy, T. Pun. Optimized wavelet domain watermark embedding strategy using linear programming. In *Proc. of SPIE*, Orlando, USA, January 2000.
25. A. Said, W. A. Pearlman. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees. In *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, p. 243–250, June 1996.
26. J. M. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. In *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 41, p. 3445–3462, December 1993.
27. P.-C. Su, H.-J. Wang, C.-C. J. Kuo. Digital image watermarking in regions of interest. In *Proc. of IS&T PICS Conf.*, Savannah, USA, April 1999.
28. H.-J. Wang, C.-C. J. Kuo. High fidelity image compression with multithreshold wavelet coding (MTWC). In *Proc. of SPIE*, San Diego, USA, August 1997.
29. H.-J. Wang, P.-C. Su, C.-C. Kuo. Wavelet-based digital image watermarking. *Optics Express*, 3:497, December 1998.
30. R. B. Wolfgang, C. I. Podilchuk, E. J. Delp. The effect of matching watermark and compression transforms in compressed color images. In *Proc. of ICIP '98*, Chicago, USA, October 1998.
31. R. B. Wolfgang, C. I. Podilchuk, E. J. Delp. Perceptual watermarks for digital images and video. In *Proc. of SPIE, EI '99*, vol. 3657, San Jose, USA, 1999.
32. X.-G. Xia, C. G. Boncelet, G. R. Arce. Wavelet transform based watermark for digital images. *Optics Express*, 3:497, December 1998.
33. L. Xie, G. R. Arce. Joint wavelet compression and authentication watermarking. In *Proc. of ICIP '98*, Chicago, USA, 1998.
34. W. Zeng, S. Lei. Transform domain perceptual watermarking with scalable visual detection – proposal for JPEG2000. Technical report, Sharp Lab., USA, 1998.
35. W. Zhu, Z. Xiong, Y.-Q. Zhang. Multiresolution watermarking for images and video: a unified approach. In *Proc. of ICIP '98*, Chicago, USA, October 1998.