

# 5

## **Ergebnisse, Zusammenfassung, Ausblick**

Aufbauend auf Kapitel 3 und 4 sollen die gewonnenen Ergebnisse diskutiert und bewertet werden, die aus dem diskreten Modell aus Kapitel 3 und der Implementierung aus Kapitel 4 gewonnen wurden. Aus diesen Ergebnissen läßt sich ein Klassifikationsschema für Verfahren der fraktalen Bildkodierung ableiten, wobei anhand der experimentell gewonnenen Ergebnisse gezeigt wird, daß nicht alle theoretisch gewonnenen Komponenten eines Systems zur fraktalen Bildkodierung für eine Klassifikation geeignet sind. Die in dieser Arbeit diskutierten experimentellen Ergebnisse zur fraktalen Bildkodierung be-

Möglichkeiten der in dieser Arbeit behandelten fraktalen Bildkodierungsverfahren auf. Basierend auf diesen Überlegungen lassen sich Konzepte und Anwendungsszenarien für den Einsatz einer fraktalen Bildkodierung entwickeln und evaluieren. Die experimentellen Ergebnisse zu den anderen Bildkompressionsverfahren wurden mit der Hilfe von öffentlich zugänglichen Programm-Sourcen gewonnen. Dies sind zum einen die Sourcen der *Independent JPEG-Group* für den JPEG-Algorithmus und zum anderen die Sourcen des *EPIC*-Kodierers von E. P. Simoncelli vom MIT für den Wavelet-Kodierer. An diesen Sourcen wurden keine funktionellen, sondern nur plattformspezifische Änderungen vorgenommen, so daß deren Leistungsfähigkeit nicht modifiziert wurde.

Den Abschluß des Kapitels liefert ein Ausblick auf mögliche Erweiterungen und Ansätze für weitere Untersuchungen im Bereich der fraktalen Bildkodierung.

## 1. Experimentelle Ergebnisse

---

Ausgehend von dem diskreten Modell und dem dort entwickelten Aufbau der Transformationen  $T_n$  sind verschiedene Kriterien für die Klassifikation von Algorithmen zur fraktalen Bildkodierung denkbar. Das vorgestellte Modell würde eine Klassifikation anhand der folgenden Kriterien zulassen:

–Partitionierungsverfahren:

    Uniforme Partitionierung: Quadratische, Trianguläre

    Adaptive Partitionierung: Quadtree, HV

–*decimation*-Operator:

    Subsampling

    Averaging

–Auswahloperatoren:

*put*-Operator

*fetch*-Operator

–*kernel*-Transformation:

    Affine Transformationen

    Allgemeine kontrahierende Transformationen

Eine Klassifikation auf der Basis von allgemeinen kontrahierenden Transformationen ist sicherlich möglich und auch sinnvoll, wird allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da aus Gründen der Berechenbarkeit ausschließlich kontrahierende affine Transformationen verwendet werden.

Die *put*- und *fetch*-Operatoren sind für eine Klassifikation nicht von Interesse, da sie fast ausschließlich von der Implementierung und der Struktur der Teilmengen  $R_i$  und  $D_i$  abhängen. Desweiteren wirkt sich deren Funktions- und Arbeitsweise weder auf die Qualität oder Kompressionsrate noch nennenswert auf die Laufzeit des Gesamtsystems aus. So bietet sich als nächstes eine Untersuchung des *decimation*-Operators an.

Das große Anwendungsspektrum von Verfahren zur Kompression von Bildern und die damit verbundene Vielfalt von unterschiedlichen Bildtypen erschwert einen Vergleich der verschiedenen Verfahren. Dies liegt unter anderem auch daran, daß einige Bildkompressionsverfahren bestimmte Bildtypen bevorzugen, was sich durch sehr hohe Kompressionsraten bei guter Bildqualität ausdrückt.

Besonders modellbasierte Verfahren, zu denen man auch die fraktale Bildkodierung zählen kann, erreichen so eine Leistung, die von anderen Verfahren bei weitem nicht erreicht werden können, die entsprechenden Spezialbilder vorausgesetzt. Basierend auf dieser Tatsache lassen sich so beliebig gute Ergebnisse produzieren, wie es z.B. auch Barnsley [Barnsley88b] [Barnsley93] für die fraktale Bildkodierung vorgeführt hat.

Barnsley's Paradebeispiel des "Barnsley-Farns" läßt sich mit Hilfe von vier affinen Transformationen kodieren, so daß eine Speicherung des Bildes mit Hilfe der affinen Transformationen nur 96 Byte (= 768 Bits entspr. 4 Transformationen à 6 Zahlen mit 32 Bit Genauigkeit) erfordert, wobei sogar eine exakte Rekonstruktion des Bildes möglich ist. Eine Speicherung als Bitmap mit einer Beispielauflösung von  $1024 \times 1024$  Pixeln und einem Byte Farbauflösung erfordert dagegen 131.072 Bytes, was einer Kompressionsrate von ca. 1365:1 entspricht. Aufgrund der auflösungsunabhängigen Kodierung des Farns mit Hilfe der affinen Transformationen läßt sich darüber hinaus jede beliebige Kompressionsrate erzeugen.



*Abb. 1: Barnsley Farn*

Zur Vermeidung dieses Effektes beziehen sich immer mehr wissenschaftliche Veröffentlichungen bei der Darstellung ihrer Ergebnisse auf eine genau definierte Menge von öffentlich zugänglichen digitalen Bildern. Diese Menge von Bildern ist vergleichbar mit dem *Calgary-Corpus* für verlustlose Kompressionsverfahren, auch wenn sie nicht so exakt wie dieser Corpus definiert ist.

Die Verwendung solcher Standard-Bilder ermöglicht darüber hinaus auch einen Vergleich von absoluten Zahlenwerten zur objektiven Bildqualität, wie z.B. in Form des PSNR. Experimentelle Untersuchungen zum Verhältnis von Kompressionsrate und Bildqualität eines verlustbehafteten Kompressionssystems müssen diesen Tatsachen Rechnung tragen, so daß allen Untersuchungen in dieser Arbeit das Bild "Lena" in der Auflösung von  $512 \times 512$  Pixeln mit 256 Graustufen als Referenzbild diene.

## Ei

Der *decim*  
und nimr  
auf die K  
*tion*-Ope  
verschie  
ersten V  
schriebe  
schieden  
in horiz  
ein horiz  
anderen  
Operato



*Abb. 2: Auswirkungen des decimation-Operators auf die Kompressionsrate*

Diese Abbildung gibt das Verhalten des PSNR als Maß für die objektive Bildqualität in Abhängigkeit von der Kompressionsrate an. Dem Verlauf der Kurven ist zu entnehmen, daß für die verschiedenen *decimation*-Operatoren nur marginale Unterschiede auftreten, die so gering sind, daß sie als bild- bzw. implementationsspezifisch bezeichnet werden können. Eine Klassifikation anhand des *decimation*-Operators ist mit diesen Ergebnissen nicht möglich und somit auch nicht nötig, da keine Auswirkungen der verschiedenen Implementierungen auf die Qualität des Gesamtsystems feststellbar sind.

### Vergleich verschiedener uniformer Partitionierungen

Den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 3 zufolge existieren verschiedene Partitionierungsverfahren für die Aufteilung des Eingabebildes in Definitions- und Wertebereiche, die sich prinzipiell in uniforme und adaptive Verfahren aufteilen lassen. Während

die uniformen Partitionierungsverfahren ein Bild gemäß der Partitionierungsvorschrift starr aufteilen, passen sich die adaptiven Verfahren mit der Aufteilung des Eingabebildes dem Bildinhalt an.

Die bei den adaptiven Partitionierungsverfahren verwendeten geometrischen Formen für die Definitions- und Wertebereiche bauen dabei meist auf den Formen der uniformen Verfahren auf, so daß zu jeder Struktur eines Definitions- und Wertebereiches ein uniformes und ein adaptives Verfahren existiert. Für die experimentelle Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Partitionierungsverfahren auf die fraktale Bildkodierung bietet sich aus diesen Gründen zuerst eine Untersuchung verschiedener uniformer Partitionierungsverfahren an.

Basierend auf den bisherigen Überlegungen ist eine Erhöhung der Kompressionsrate gleichbedeutend mit einer Reduzierung der Anzahl der Transformationen, die für die Kodierung des Bildes eingesetzt werden. Eine Untersuchung verschiedener uniformer Partitionierungsverfahren kann aus diesem Grunde auch nicht zu einer wesentlichen Veränderung der objektiven Bildqualität in Abhängigkeit von der Kompressionsrate führen, was die folgenden Ergebnisse auch experimentell belegen. Die verschiedenen untersuchten uniformen Partitionierungen führten zu den folgenden Ergebnissen:

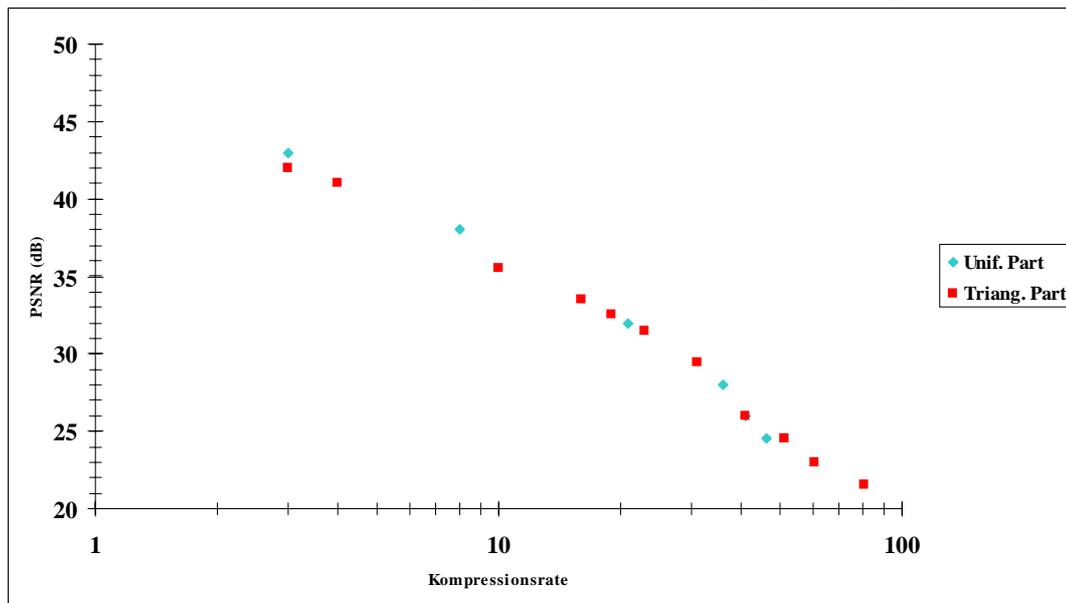


Abb. 3: Vergleich verschiedener uniformer Partitionierungsverfahren

Die Abbildung zeigt wiederum das Verhalten des PSNR in Abhängigkeit von der Kompressionsrate. Dem Kurvenverlauf ist somit zu entnehmen, daß sich die objektive Bildqualität mit abnehmender Anzahl der Transformationen für die beiden untersuchten uniformen Partitionierungsverfahren annähernd gleich verhält und damit die obigen theoretischen Überlegungen erfüllt. Unterschiede in der Bildqualität bei gleicher Kompressionsrate lassen sich im geringen Maße für die subjektive Bildqualität feststellen, was sich gemäß der Ausführungen zur Bildqualität auf Seite 99ff auf den Verlauf der Partitionierungsgrenzen zurückführen läßt. Diese Verbesserung der subjektiven Bildqualität fällt auch deshalb so gering aus, weil  $2/3$  der Partitions-grenzen immer noch horizontal und vertikal verlaufen und nur  $1/3$  der Grenzen einen  $45^\circ$  Winkel zum Bildrand

besitzen. Eine Verbesserung der objektiven Bildqualität läßt sich durch eine Veränderung des Verlaufs der Partitionierungsgrenzen also nicht herbeiführen, was auch den vorangegangenen theoretischen Überlegungen entspricht.

## Vergleich verschiedener adaptiver Partitionierungen

Im Gegensatz zum Einsatz der verschiedenen uniformen Partitionierungsverfahren läßt die Anwendung von adaptiven Partitionierungsverfahren nicht nur eine Verbesserung der subjektiven Bildqualität erwarten, sondern durch die Anpassung der Partitionierung an den Bildinhalt und die damit verbundene Verringerung der Anzahl der Transformationen sollten diese Verfahren auch zu einer höheren Kompressionsrate bei gleicher objektiver Bildqualität führen.

Für diese Untersuchung diente die uniforme Partitionierung auf der Basis von Quadraten als Referenzverfahren. Als adaptive Partitionierungsverfahren kamen eine Quadtree- und eine HV-Partitionierung gemäß Seite 96 und Seite 97 zur Anwendung. Diese verschiedenen Partitionierungsverfahren führten zu den folgenden experimentellen Ergebnissen:

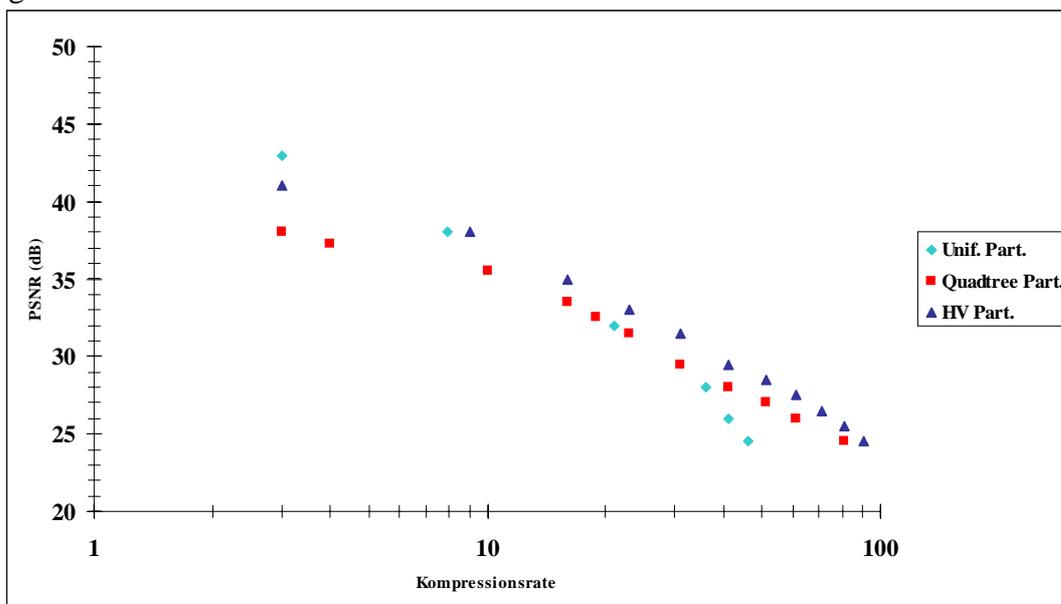


Abb. 4: Vergleich verschiedener adaptiver Partitionierungsverfahren

Die Ergebnisse dieser Graphik lassen sich nun unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten formulieren und interpretieren. Betrachtet man die  $x$ -Achse und die darauf abgetragene Kompressionsrate, so zeigt sich, daß die adaptiven Partitionierungsverfahren mit zunehmender Kompressionsrate eine bessere objektive Bildqualität in Form des PSNR liefern als die uniforme Referenzpartitionierung.

Bei der Betrachtung dieser Tendenz fallen weitere Aspekte auf. Bei niedrigen Kompressionsraten bis ca. 20:1 ist die uniforme Partitionierung den beiden adaptiven Verfahren ebenbürtig und zum Teil sogar überlegen. Dieses Verhalten gibt den Einfluß jener Kodierungsfehler auf den PSNR wieder, die durch die Kodierung von großen Bildbereichen beim Einsatz von adaptiven Partitionierungsverfahren entstehen. Das

Ziel beim Einsatz einer adaptiven Partitionierung ist, möglichst große Bildbereiche mit einer Transformation zu kodieren, so daß der durch diese Kodierung erzeugte Fehler auch entsprechend stärker in die Berechnung des PSNR einfließt.

Bei geringen Kompressionsraten und einer entsprechend großen Anzahl von Transformationen zur Beschreibung des Bildes scheint sich dieses Vorgehen nicht in der erhofften Form zu lohnen. Durch die genügend große Anzahl von Transformationen können die großen Bildbereiche mit Hilfe von mehreren Transformationen, die jeweils nur einen Ausschnitt dieses Bildbereichs kodieren, genauer kodiert werden. Da eine gleiche Kompressionsrate auch die gleiche Anzahl von Transformationen für beide Arten von Partitionierungsverfahren bedeutet, ist es die Verteilung der Transformationen bzw. der entsprechenden Wertebereiche, die diesen Effekt hervorrufen.

Eine uniforme Partitionierung bedeutet eine gleichmäßige vollständig disjunkte Überdeckung des Eingabebildes, so daß der Kodierungsfehler für das Gesamtbild allein von der Fähigkeit der verwendeten Transformationen abhängt, das Bild möglichst exakt zu beschreiben. Zu diesem Zwecke wird aus den Mengen  $J$  und  $I$  aller möglichen Werte- bzw. Definitionsbereiche für jeden Werte- der optimale Definitionsbereich gesucht, so daß die beste Transformation mit dem geringsten Kodierungsfehler gefunden wird.

Dies ändert sich bei den adaptiven Partitionierungsverfahren in der Art, daß hier der Versuch unternommen wird, die Anzahl der eingesetzten Transformationen möglichst gering zu halten, was durch die Einführung einer Schranke  $\varepsilon_C$  für den Kodierungsfehler erreicht werden soll. Eine Unterteilung eines Bildbereiches in mehrere kleinere Bildbereiche, und damit eine Erhöhung der Anzahl der für die Kodierung verwendeten Transformationen für diesen Bildbereich, wird genau dann vorgenommen, wenn diese Fehlerschranke  $\varepsilon_C$  überschritten wird.

Die Wahl dieser Schranke  $\varepsilon_C$  ist für den beobachteten Effekt, daß eine uniforme Partitionierung einem adaptiven Verfahren bei geringen Kompressionsraten überlegen ist, ausschlaggebend. Der Effekt ist Ausdruck der Tatsache, daß die Unterteilung des Bildes zur Folge hat, daß große Bildbereiche mit einem Fehler kodiert werden, der nahe an der Fehlerschranke  $\varepsilon_C$  liegt, und  $\varepsilon_C$  über dem Kodierungsfehler gewählt wurde, der mit einer uniformen Partitionierung erreicht werden kann.

Mit zunehmender Kompressionsrate und abnehmender Anzahl von Transformationen tritt dieser Effekt dann immer mehr in den Hintergrund und wandelt sich ins Gegenteil, was am Verlauf der Meßreihen abzulesen ist. Durch die abnehmende Anzahl von Transformationen für die Bildkodierung kommt dann die Eigenschaft der adaptiven Partitionierungsverfahren immer mehr zur Geltung, die Anzahl der für die Kodierung eines Bildbereiches verwendeten Transformationen von dessen Inhalt abhängig zu machen. Die Mehrzahl der Transformationen wird dabei für jene Bildbereiche eingesetzt, die potentiell große Fehler bei einer uniformen Kodierung hervorrufen würden.

Durch die Erhöhung der Transformationsanzahl für diese Bildbereiche wird die Kodierung genauer und der auftretende Fehler verringert. Je ausgeprägter diese Eigenschaft der Adaption der Transformationsanzahl an die zu kodierenden Bildbereiche ist, um so performanter ist ein Gesamtsystem zur fraktalen Bildkodierung bei steigender Kompressionsrate. Während die objektive Bildqualität der uniformen Partitionierung

bei Kompressionsraten von größer 20:1 stark abfällt, ist dieser Qualitätsverlust bei den beiden adaptiven Verfahren nicht so stark ausgeprägt und die Qualitätskurve fällt mit steigender Kompressionsrate langsamer und nicht so steil ab.

Desweiteren zeigt sich, daß die HV-Partitionierung bessere Ergebnisse erzielt als die Quadtree-Partitionierung, was im Einklang mit den bisherigen Ergebnissen steht, da das Hauptmerkmal der HV- gegenüber der Quadtree-Partitionierung die variabelere und adaptivere Unterteilung eines Bildrechtecks ist.

Damit erfüllen diese experimentellen Untersuchungen die Erwartungen, die aufgrund der vorangegangenen theoretischen Überlegungen an sie gestellt wurden. Darüber hinaus zeigt sich, daß eine Steigerung der objektiven Qualität mit der Fähigkeit eines Partitionierungsverfahrens einhergeht, sich an den Bildinhalt anzupassen. Diese Fähigkeit ist ausschlaggebend für den Verlauf der Qualitätskurve bei steigender Kompressionsrate, wobei der Kurvenverlauf auch als ein Maß für die Fähigkeit der Adaption des Partitionierungsverfahrens angesehen werden kann. Die beobachteten Steigerungen der objektiven Bildqualität gehen aufgrund der Deutlichkeit der Steigerung auch mit einer entsprechenden Steigerung der subjektiven Bildqualität einher.

## Klassifikation

---

Betrachtet man die experimentellen Ergebnisse dieses Kapitels zusammenfassend und setzt sie in Relation zu den Ausführungen über eine mögliche Klassifikation auf Seite 104, so erscheint eine Klassifikation nur noch anhand der folgenden Kriterien als sinnvoll:

–Partitionierungsverfahren:

    Uniforme Partitionierung:

        Quadratische, Trianguläre

    Adaptive Partitionierung:

        Quadtree, HV

–*kernel*-Transformation:

    Affine Transformationen

    Allgemeine kontrahierende Transformationen

Allgemein lassen sich Systeme zur fraktalen Bildkodierung somit anhand des eingesetzten Partitionierungsverfahrens und der verwendeten Transformationen klassifizieren. Bei den Partitionierungsverfahren lassen sich grundsätzlich uniforme und adaptive Verfahren unterscheiden. Eine weitere Klassifikation der uniformen Partitionierungsverfahren anhand der Partitionierungsvorschrift ist möglich, liefert allerdings lediglich eine Verbesserung der subjektiven Bildqualität.

Der Übergang in die Klasse der adaptiven Partitionierungsverfahren liefert dagegen auch eine Verbesserung der objektiven Bildqualität, wie auf Seite 108ff schon ausgeführt wurde. Innerhalb der Klasse der adaptiven Partitionierungsverfahren ist analog zu den uniformen Verfahren eine Klassifikation anhand der Partitionierungsvorschrift möglich. Diese führt dann, im Gegensatz zum uniformen Fall, auch zu einer Änderung der objektiven Bildqualität, so daß der Verlauf der Qualitätskurven in Abhängigkeit von der Kompressionsrate auch als ein Maß für die Fähigkeit der Verfahren zur Adaption an den Bildinhalt angesehen werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation besteht sicherlich auch auf der Basis der verwendeten Transformationen. Diese Möglichkeit wurde in dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht, da aus Gründen der Berechenbarkeit ausschließlich kontrahierende affine Transformationen verwendet wurden. Von den aufgrund des diskreten Modells möglichen vier Hauptklassen *decimation-Operator*, *Auswahloperator*, *Partitionierungsverfahren* und *kernel-Transformation* bleiben somit aufgrund der experimentellen Ergebnisse nur noch die beiden Klassen *Partitionierungsverfahren* und *kernel-Transformation* übrig. Die *decimation*- und die *Auswahloperatoren* haben sich als rein technische Operatoren erwiesen, die keine Auswirkungen auf den Verlauf der Qualitätskurve in Abhängigkeit von der Kompressionsrate des Gesamtsystems zur fraktalen Bildkodierung besitzen. Die Auswirkungen dieser beiden Operatoren sind rein auf die spezielle Implementierung bezogen und äußern sich z.B. in einem leicht veränderten Laufzeitverhalten des Gesamtsystems.

## 2. Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die fraktale Bildkodierung in verschiedenen Varianten diskutiert und miteinander verglichen wurde, soll sie in diesem Abschnitt in Relation zu anderen Verfahren zur Kompression von Bilddaten gesetzt werden. Ein solcher Vergleich in Bezug auf die Leistungsparameter Kompressionsrate, Bildqualität und Funktionalität des Codec's hilft, das Einsatzspektrum der verschiedenen Verfahren und damit insbesondere auch der fraktalen Bildkodierung zu bestimmen und die bisher gefundenen Ergebnisse zusammenfassend zu bewerten.

Zu diesem Vergleich dient zum einen das JPEG-Verfahren, wie es in *Überblick über die JPEG-Technik* auf Seite 18 beschrieben wurde, und zum anderen ein Verfahren auf der Basis von Wavelets gemäß *Wavelet Analyse (wavelet analysis)* auf Seite 28. Mit dem JPEG-Algorithmus besitzt man einen etablierten und weitverbreiteten Standard zur Kompression von Bilddaten als Referenzverfahren. Die im folgenden dargestellten experimentellen Ergebnisse beziehen sich auf eine öffentlich zugängliche Implementierung der *Independent JPEG-Group* [Lane96].

Verfahren auf der Basis von Wavelets sind dagegen noch Gegenstand von aktuellem Forschungsinteresse mit dem Ziel, ein leistungsfähiges System für die Kompression von Bilddaten zu entwickeln. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines standardisierten Verfahrens auf Wavelet-Basis als ein weiteres Referenzverfahren noch nicht möglich. Die nachfolgenden experimentellen Ergebnisse wurden deshalb mit Hilfe des öffentlich zugänglichen EPIC-Wavelet Kodierers von E. P. Simoncelli am MIT vorgenommen [Simoncelli95]. Dieser Wavelet Kodierer arbeitet mit biorthogonalen Wavelets und einer anschließenden Kombination einer RL- und einer Huffman-Kodierung. Er gilt als der momentan leistungsfähigste öffentlich verfügbare Kodierer auf Wavelet-Basis.

Zur Unterstützung und auch zum Vergleich der eigenen Ergebnisse zur fraktalen Bildkodierung wurde als drittes Referenzverfahren das FIF-System zur fraktalen Bildkodierung von Barnsley gewählt. Die damit erzielten Ergebnisse beziehen sich auf das FIF-Verfahren, welches Barnsley's Firma *Iterated Systems Inc.* mittlerweile in einer

Version über das Netz öffentlich zugänglich macht [Barnsley96]. Das FIF-System ist ausschließlich für die Kompression von Farbbildern gedacht, so daß für einen realistischen Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Verfahren eine gewisse Anpassung der erzielten FIF-Ergebnisse notwendig war, da alle anderen Ergebnisse gemäß *Kompressionsrate und Maße für die Bildqualität* auf Seite 99 auf die Kodierung des Bildes "Lena" als Graustufenbild bezogen sind.

Die Anpassungen der Ergebnisse gehen dabei von der Annahme aus, daß vor einer fraktalen Kodierung eine Transformation von einer RGB- in eine YUV-Darstellung durchgeführt wird und anschließend die drei Komponenten Y, U und V mit unterschiedlicher Auflösung kodiert werden. Gemäß den Ausführungen *Farbraum-Transformation* auf Seite 9 wurde für diese Auflösungen angenommen, daß die Komponente Y mit voller und die Komponenten U und V mit einem Viertel der Auflösung kodiert werden. Desweiteren wurde bei der Anwendung des FIF-Systems die Einstellung "best quality" gewählt, wobei die konkreten Auswirkungen auf den Kodierungsprozeß nicht nachvollziehbar waren. Die Frage, ob diese Einstellung in Relation zu einem ähnlichen Verfahren steht, wie es in *Verringerung des Suchaufwands* auf Seite 98 beschrieben wird, bleibt offen. Iterated System Inc. stellt das FIF-System als "black box"-Applikation zur Verfügung, ohne konkrete Angaben über die Funktions- und Arbeitsweise zu veröffentlichen, so daß man für einen realistischen Vergleich auf die obigen Annahmen angewiesen ist, obwohl die damit erzielten Ergebnisse natürlich unscharf sind.

Von den in dieser Arbeit untersuchten Verfahren zur fraktalen Bildkodierung diente das performanteste Verfahren auf der Basis einer HV-Partitionierung als Vergleichsverfahren, so daß ein Vergleich aller Verfahren zu den folgenden Ergebnissen führte:

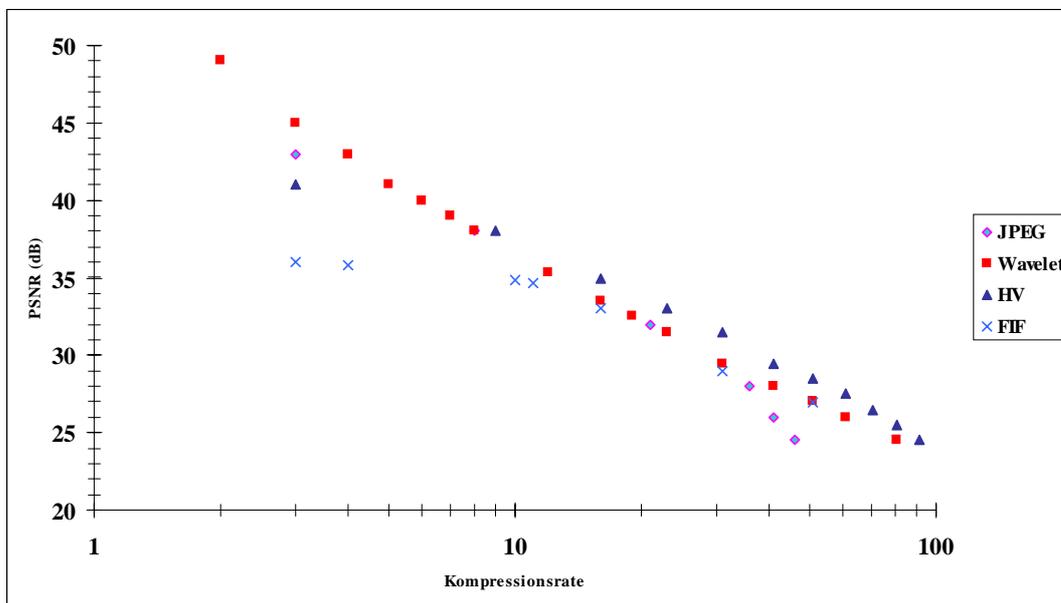


Abb. 5: Vergleich verschiedener Kompressionsverfahren

Betrachtet man die obige Graphik, so fallen zuerst die relativ ähnlichen Ergebnisse der Verfahren bei mittleren Kompressionsraten von etwa 9:1 bis ca. 25:1 auf. In diesem Bereich unterscheiden sich die verschiedenen Verfahren nur so gering, daß eine Entscheidung über einen Einsatz eines der untersuchten Verfahren innerhalb dieses Bereiches

aufgrund anderer Kriterien an das Gesamtsystem, wie z.B. Laufzeitverhalten oder Speicherbedarf des Kodierers, getroffen werden sollte. Damit sind etablierte Verfahren, wie das hier betrachtete JPEG-Verfahren, natürlich bevorzugt, da für diese Verfahren aufgrund der langen Entwicklungszeit mittlerweile viele Optimierungen in Hard- und Software mit dem Ziel der Laufzeitbeschleunigung oder einer Verringerung des Speicherbedarfs des Kodierers existieren.

Verläßt man allerdings diesen Bereich der mittleren Kompressionsraten, so treten diese implementationsspezifischen Aspekte immer mehr in den Hintergrund, da die Qualitätsunterschiede der Verfahren größer und damit entscheidender werden. Bei geringen Kompressionsraten bis ca. 10:1 treten dann mehrere Effekte auf.

Zum einen fällt der Verlauf der Qualitätskurve für den Wavelet-Kodierer auf. Durch die Verwendung von biorthogonalen Wavelets ist er in der Lage, das Eingabebild vollständig zu rekonstruieren, was sich auch im Verlauf der Qualitätskurve zum Ursprung hin äußert.

Desweiteren sind die Ergebnisse des FIF-Systems von Barnsley auffällig. Sie liegen weit unter den Resultaten der anderen Verfahren, bleiben dafür allerdings bis zu einer Kompressionsrate von ca. 12:1 relativ konstant und erreichen erst dann in etwa das Niveau der anderen Verfahren. Dieses Verhalten läßt sich nur durch implementationspezifische Eigenheiten des Systems erklären, aufgrund derer das Eingabebild für niedrige Kompressionsraten im Verhältnis zu den anderen Verfahren so schlecht komprimiert wird. Die genauen Gründe für dieses Verhalten sind aufgrund der "black box"-Eigenschaft des Systems allerdings nicht nachvollziehbar.

Die beiden anderen Verfahren, JPEG und HV-Partitionierung, liegen in diesem Bereich in etwa gleich, wobei der JPEG-Algorithmus zum Ursprung hin etwas bessere Resultate liefert, während sich mit zunehmender Kompressionsrate schon leichte Vorteile für das HV-Partitionierungsverfahren abzeichnen.

Der weitaus interessanteste Bereich dieser Graphik ist der Bereich von Kompressionsraten größer 20:1. Hier zeigt sich mit zunehmender Kompressionsrate ganz deutlich das starke Abfallen der Qualitätskurve des JPEG-Algorithmus. Während bei den anderen Verfahren die Qualitätskurve relativ flach und gleichmäßig abfällt, bricht die Qualitätskurve des JPEG-Algorithmus ab einer Kompressionsrate von ca. 35:1 stark ein, was sich im kodierten Bild durch einen stark zunehmenden *blocking effect* zeigt.

Die Verläufe der anderen Kompressionsverfahren, Wavelet, FIF und HV-Partitionierung, unterscheiden sich nur marginal. Alle drei Verfahren fallen in etwa gleich stark ab, ohne allerdings einen so starken Einbruch zu besitzen wie der JPEG-Algorithmus. Dabei zeigt sich, daß die HV-Partitionierung im Vergleich durchweg etwas bessere Werte liefert, wobei der Unterschied zur Wavelet-Kodierung mit zunehmender Kompressionsrate immer geringer wird. Entgegen dem Verhalten bei geringen Kompressionsraten ist das FIF-System in diesem Bereich in der Lage, den JPEG-Algorithmus zu schlagen. Die Resultate des FIF-Systems liegen nur leicht unter den Werten des Wavelet-Kodierers.

Für eine Betrachtung der objektiven Bildqualität in Abhängigkeit von der Kompressionsrate ergibt sich damit der folgende Gesamteindruck. Sowohl das FIF-System als auch der JPEG-Algorithmus weisen starke Einbrüche in der Qualitätskurve auf. Das FIF-System bleibt bei niedrigen Kompressionsraten weit hinter den Resultaten der anderen Verfahren zurück und die Qualität eines JPEG-kodierten Bildes fällt bei höhe-

ren Kompressionsraten stark ab. Einzig der Wavelet-Kodierer und die HV-Partitionierung weisen einen gleichmäßigen Verlauf der Qualitätskurve auf, mit leichten Vorteilen des Wavelet-Kodierers bei niedrigen Kompressionsraten und leichten Vorteilen der HV-Partitionierung bei höheren Kompressionsraten.

Entsprechend diesem Verhalten der Qualitätskurven sollte auch der Einsatz der verschiedenen Verfahren in konkreten Anwendungsszenarien sein, wobei aufgrund der teilweise nur geringen Unterschiede in der Kompressionsrate und der Bildqualität weitere Aspekte der verschiedenen Verfahren in Betracht gezogen werden sollten. Diese Aspekte lassen sich prinzipiell wieder in implementationsspezifische und -unabhängige Aspekte unterteilen. Wie bereits erwähnt, existieren für den etablierten JPEG-Standard mittlerweile die verschiedensten Optimierungen, während dies aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungszeiten für die fraktale Bildkodierung und die Wavelet-Verfahren noch nicht der Fall ist. Aus diesem Grund werden im folgenden nur die implementationsunabhängigen Aspekte, die für den Einsatz eines der Verfahren sprechen können, betrachtet. Ist aufgrund dieser Aspekte eine Entscheidung für eines der Verfahren gefallen, dann kann eine Betrachtung der implementationsspezifischen Aspekte und möglicher Optimierungen immer noch erfolgen.

Aufgrund der Verschiedenheit möglicher Applikationsszenarien für Bildkompressionssysteme ist ein Vergleich der verschiedenen Codec's für Verfahren zur Bildkompression sinnvoll und für einen erfolversprechenden Einsatz notwendig. Die folgende Tabelle listet für diese drei Bildkompressionsverfahren die wichtigsten und die für einen Einsatz entscheidenden Eigenschaften auf:

	<b>Fraktale Bildkodierung</b>	<b>JPEG bzw. MPEG</b>	<b>Wavelet</b>
<b>Kodierung</b>	Verlustbehaftet	Verlustbehaftet / Verlustlos	Verlustbehaftet / Verlustlos
<b>Sequentielle Kodierung</b>	Ja	Ja	Ja
<b>Hierarchische Kodierung</b>	(Ja)	(Ja)	Ja
<b>Progressives Senden</b>	Nein	Nein	Ja
<b>Videokodierung Intraframe</b>	Ja	Ja (M-JPEG)	Ja
<b>Videokodierung Interframe</b>	Zu entwickeln	Ja	Zu entwickeln
<b>Komplexität des Codec's</b>	Asymmetrisch	Symmetrisch / Asymmetrisch	Symmetrisch

*Abb. 6: Vergleich der Funktionalitäten verschiedener Kompressionsmethoden*

Da hier nur die implementationsunabhängigen Aspekte der Bildkompressionsverfahren betrachtet werden sollen, gelten diese Angaben immer für die ganze Klasse von Bildkompressionsverfahren unabhängig von einzelnen Verfahren, so daß die Tabelle auch nur drei Spalten besitzt. Eine Bewertung der verschiedenen Eigenschaften führt zu einem Anwendungsspektrum für verschiedene Systeme zur Bildkompression auf der Ba-

---

sis der aufgelisteten Kompressionsverfahren. Damit werden zum einen die Grenzen und Möglichkeiten einer fraktalen Bildkodierung im Vergleich zu den anderen Verfahren aufgezeigt und zum anderen wird eine Einordnung in das Schema der Pixel-basierten Kompressions-Algorithmen erreicht, so wie es in Kapitel 1 formuliert wurde.

Ein Hauptentscheidungskriterium für den Einsatz von Systemen zur Kompression von Bildern ist die Frage nach den Möglichkeiten einer Kodierung mit möglichst geringem Kodierungsfehler bzw. nach der Möglichkeit einer verlustlosen Kodierung. Bestimmte Anwendungsgebiete, wie z.B. in der Medizin, schließen den Einsatz von verlustbehafteten Bildkompressionssystemen aus bzw. schränken deren Einsatz stark

Basis von Wavelets diese Eigenschaft inhärent besitzen, sind sowohl für JPEG-basierte Verfahren als auch für eine fraktale Bildkodierung zusätzlich Rechen- und Speicheraufwand notwendig (s. Seite 24 u. Seite 82ff).

Damit sind Wavelet-basierte Verfahren für Anwendungs-Szenarien, die in eine inhomogene Netzwerkumgebung mit unterschiedlichen Bandbreiten eingebunden sind, aufgrund dieser inherenten Funktionalität für einen Einsatz prädestiniert. Dies wird desweiteren durch die Eigenschaft zum progressiven Senden unterstützt, einer Eigenschaft, die weder bei einer JPEG- noch bei einer fraktalen Bildkodierung vorhanden ist.

Aufgrund der bisherigen Diskussion der Eigenschaften und Fähigkeiten der drei behandelten Verfahren zur Kodierung von Einzelbildern läßt sich einerseits für jedes der Verfahren ein typisches Anwendungsprofil erstellen. Für den Fall eines gegebenen Anwendungsszenarios unterstützt diese Diskussion andererseits auch die Auswahl des geeigneten Verfahrens.

Diese Vorgehensweise läßt sich auch auf die Kodierung von Bildsequenzen, also Videos, übertragen. Bei der Diskussion der Eigenschaften und Fähigkeiten der drei Verfahren zur Videokodierung werden die daraus resultierenden Unterschiede im Bezug auf das Anwendungsprofil der Verfahren noch wesentlich deutlicher. Alle drei Verfahren besitzen natürlich die prinzipielle Fähigkeit, auch Videosequenzen auf der Basis einer reinen Intraframe-Kodierung zu komprimieren. Doch schon aufgrund der Komplexität der Verfahren ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften und damit auch Einsatzgebiete.

Sowohl die JPEG- als auch die Wavelet-Kodierung besitzt eine symmetrische Komplexität, so daß die Laufzeit für das Kodieren und Dekodieren im wesentlichen gleich ist. Darin unterscheidet sich die fraktale Bildkodierung ganz wesentlich, da sich aus dem höheren Rechenaufwand für die Kodierung eine asymmetrische Komplexität und somit ein asymmetrisches Laufzeitverhalten ergibt. Da die Komplexität der fraktalen Bildkodierung sowieso schon die der beiden anderen Verfahren übersteigt, ergibt sich aus diesen beiden Faktoren zwangsläufig ein anderes Einsatzspektrum.

Das symmetrische Laufzeitverhalten und die geringere Komplexität der JPEG- und Wavelet-Verfahren prädestiniert beide Verfahren für den Einsatz in Kommunikationssystemen, in denen eine bidirektionale Echtzeit-Kommunikation gefordert wird. So werden beide Verfahren in Varianten auch schon für Bildtelefonie genutzt und erreichen dort auch brauchbare Resultate, die benötigte Hardwareunterstützung für die notwendigen Berechnungen vorausgesetzt [ITU93a] [ITU95].

Der Einsatz einer fraktalen Bildkodierung für eine Echtzeit-Kommunikation stellt aufgrund der höheren Komplexität und der gegebenen engen Zeitschranken sehr viel höhere Anforderungen an die notwendige unterstützende Hardware. Im Gegensatz zu den beiden anderen Verfahren kommt die Hardware-Unterstützung dann auch fast ausschließlich dem Kodierer zugute, da die Dekodierung aufgrund ihrer geringen Komplexität nur geringe Ansprüche an eine Hardware-Unterstützung stellt.

Für eine reine Intraframe-Videokodierung auf der Basis der hier behandelten Verfahren läßt sich somit zusammenfassend feststellen, daß ihr Einsatz durch ihre Komplexität und damit durch ihr Laufzeitverhalten bestimmt wird. Die annähernd gleichen Kompressionsraten (s. Seite 112) lassen diesen Aspekt bei einer Entscheidung über einen möglichen Einsatz eines der Verfahren in den Hintergrund treten. Kodierungsverfahren, die in Bezug auf die Kommunikation in symmetrischen Anwendungsszenarien



Diese Annahme kann aufgrund der Erfahrungen und Algorithmen aus dieser Arbeit als unrealistisch und von einem vollautomatisch arbeitenden System zur fraktalen Bildkodierung als nicht erfüllbar angesehen werden. Selbst Eingabebilder, die exakt durch ein fraktales Modell beschreibbar sind, wie z.B. der Barnsley Farn, werden aufgrund der angewendeten Partitionierungsverfahren durch diese Systeme nicht als solche erkannt. Eine solche Erkennung läßt sich nur durch die Integration menschlicher Interaktion in das Kompressionssystem vornehmen, wie es die ersten Systeme von Barnsley auch vorsahen. Dies schränkt den Einsatz dieser Systeme natürlich sehr stark ein, so daß auch Barnsley von diesem Ansatz sehr schnell Abstand nahm und auch in dieser Arbeit nur vollautomatisch arbeitende Systeme betrachtet wurden.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich vor allem auf den Aspekt der Einflußnahme der aus dem diskreten Modell abgeleiteten Komponenten auf das Gesamtsystems und einer daraus resultierenden möglichen Leistungssteigerung durch die Optimierung einzelner Komponenten. So zeigte sich, daß technische Komponenten, die durch die Übertragung auf den diskreten Fall und die Implementierung bedingt sind, wie z.B. der *decimation*-Operator, keinen wesentlichen Einfluß auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems haben.

Als wesentliche Ansatzpunkte für eine Steigerung des Gesamtsystems ergaben sich das verwendete Partitionierungsverfahren und die eingesetzten *kernel*-Transformationen. Als Resultat ergab sich, daß das Gesamtsystem mit zunehmender Kompressionsrate um so leistungsfähiger wird, je adaptiver das Partitionierungsverfahren sich an den Inhalt des Eingabebildes anpaßt. Für geringe Kompressionsraten ergab sich ein Vorteil für den Einsatz von uniformen Partitionierungsverfahren.

Für die betrachteten Systeme zur fraktalen Bildkodierung zeigte sich im Anschluß, daß im Vergleich mit anderen Kompressionsverfahren, wie z.B. JPEG- und Wavelet-basierte Verfahren, Unterschiede in der Kompressionsrate und der Bildqualität zwar vorhanden sind, die allerdings für große Bereiche des Einsatzspektrums der Kompressionsverfahren für einen Einsatz eines speziellen Systems nicht entscheidend sind. Die Verbindung mit einem Vergleich der Funktionalität der verschiedenen Codec's ergab vielmehr, daß gerade diese Funktionalität über den Einsatz eines speziellen Kompressionsverfahrens entscheidend sein kann. Für den Einsatz in einem vorgegebenen Anwendungs-Szenario sind die Fähigkeiten des Codec's, wie z.B. symmetrische bzw. asymmetrische Komplexität oder progressives Senden, im Verhältnis zu den teilweise nur marginalen Vorteilen bei den Kompressionsraten viel entscheidender. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen damit auch, daß Aussagen der Form "*Ich komprimiere nur noch fraktal, wegen der besseren Kompressionsraten*" zu pauschal und unbegründet sind.

Als interessanter Nebenaspekt stellte sich desweiteren bei diesen Untersuchungen heraus, daß das FIF-Verfahren von Barnsley dem im Rahmen dieser Arbeit implementierten Verfahren auf der Basis einer HV-Partitionierung unterlegen ist. Dies etwas unerklärliche Verhalten des FIF-Verfahrens äußert sich vor allem bei niedrigen Kompressionsraten in einer schlechten objektiven Bildqualität, was die Auswirkungen einer Vor- und Nachbearbeitung des Eingabebildes zur Steigerung der subjektiven Bildqualität sein könnten.

Ein entscheidender Nachteil fraktaler Bildkodierungsmethoden ist die bis heute fehlende Unterstützung einer effektiven Interframe-Kodierung und damit die Implementierung einer effektiven Kodierung von Videosignalen, was auch im folgenden Ausblick zum Ausdruck kommt.

## 4. Ausblick

Sowohl das theoretische Modell aus Kapitel 2 als auch das diskrete Modell aus Kapitel 3 lassen sich problemlos auf die Kodierung von Videos anwenden. Eine solche Anwendung impliziert allerdings, daß das Video als dreidimensionales Volumenmodell und nicht mehr als eine Folge von Einzelbildern interpretiert wird. Eine solche Kodierung ist möglich und bedeutet z.B. die Erweiterung der Quadtree-Partitionierung für Einzelbilder in eine Octree-Partitionierung für Videosequenzen.

Die Erfahrung mit anderen Verfahren zur Bildkompression, wie z.B. JPEG, hat allerdings gezeigt, daß die Art der Erweiterung für die Entfernung der zeitlichen Redundanz nur bedingt geeignet ist. Wesentlich effektiver sind Verfahren zur Bestimmung und Vorhersage von Bewegungen zwischen einzelnen Bildern einer Videosequenz. Diese Erkenntnis führte im Falle des JPEG-Algorithmus für Einzelbilder auch zur Entwicklung der MPEG-Algorithmus für Videos. Diese Erfahrungen legen die Entwicklung von Verfahren zur *motion compensation* und *motion estimation* für die fraktale Bildkodierung nahe, will man ähnlich gute Resultate erreichen wie sie heute mit frequenzorientierten Ansätzen schon möglich sind.

Die Anwendung von Methoden und Verfahren der fraktalen Bildkodierung auf Signale im Frequenzbereich ist eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit und stellt eine Verbindung zu frequenzorientierten Verfahren her. Die Vorgehensweise würde z.B. bedeuten, daß ausgehend von dem dreistufigen Kodierungsschema der frequenzorientierten Kompressionssysteme, bestehend aus *Transformation*, *Quantisierung* und *Entropie-Kodierung*, ein vierstufiges Kodierungsschema, bestehend aus *Transformation*, *fraktale Kodierung*, *Quantisierung* und *Entropie-Kodierung* entwickelt werden kann.

In diesem Kontext spielt die Struktur des transformierten Signals im Frequenzraum die entscheidende Rolle und desweiteren die Frage, inwieweit sich das transformierte Signal effektiv fraktal kodieren läßt. Auch sind die Auswirkungen der veränderten Struktur des transformierten und fraktal kodierten Signals auf die nachfolgenden Schritte *Quantisierung* und *Entropie-Kodierung* noch ungeklärt. Für die Bestimmung der effektivsten Methoden für diese beiden Verarbeitungsschritte bedarf es auch hier weiterer Untersuchungen der veränderten Signalstruktur.

Mit der zunehmenden Rechengeschwindigkeit moderner Rechnersysteme kann man sich in Zukunft sicher auch von dem Einsatz strikt kontrahierender affiner Transformationen lösen und den Einsatz allgemeiner kontrahierender Transformationen untersuchen.

