
1 Einleitung

Die Digitalisierung und PCM–Codierung von Fernsehsignalen führt im Vergleich zu anderen Nachrichtenquellen auf eine relativ hohe Datenrate. Im Fall des hochauflösenden digitalen Fernsehens (High Definition Television – HDTV) [45] liegt diese Datenrate bei 864 Mbit/s [2]. Mit Verfahren der Quellencodierung läßt sich die Datenrate reduzieren, was eine wirtschaftliche Nutzung vorhandener Übertragungskanäle ermöglicht. Um die Datenrate zu reduzieren, bedient sich die Quellencodierung der Redundanz– und Irrelevanzreduktion, wobei die Irrelevanzreduktion im Gegensatz zur Redundanzreduktion Codierfehler erzeugt. Zur Erhaltung der hohen HDTV–Bildqualität muß hierbei jedoch sichergestellt sein, daß keine sichtbaren Fehler entstehen.

Die Redundanzreduktion nutzt die örtlichen und zeitlichen statistischen Bindungen einer Bildsequenz für die Datenreduktion aus. Dabei werden diejenigen im Signal enthaltenen Informationen nicht übertragen, die auch beim Decoder bekannt bzw. berechenbar sind. Die Bild–zu–Bild–Redundanz aufgrund zeitlicher statistischer Bindungen läßt sich sehr effizient durch eine bewegungskompensierende Prädiktion reduzieren [5]. Die Redundanz aufgrund der örtlichen statistischen Bindungen innerhalb eines Bildes kann mit einer Transformationscodierung (TC) [20] [28] oder Teilbandcodierung (TBC) [9] [20] reduziert werden. Die Irrelevanzreduktion unterdrückt im Coder diejenigen im Signal enthaltenen Informationen, die vom menschlichen Auge als Empfänger nicht wahrgenommen werden [15]. Diese Datenreduktion verursacht meßbare Codierfehler, die unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle liegen. Auch die Irrelevanz kann mit einer TC oder TBC stark reduziert werden.

Sowohl die TC als auch die TBC führen eine spektrale Zerlegung des Eingangssignals durch. Die TC setzt dafür eine Transformation ein, die TBC eine sog. Analysefilterbank. Theoretische Untersuchungen [47] haben festgestellt, daß mit der Teilbandcodierung eine größere Redundanzreduktion erreicht werden kann als mit der blockweise arbeitenden TC, da bei der TC im Gegensatz zur TBC die statistischen Bindungen zwischen benachbarten Blöcken nicht ausgenutzt werden. Daher wird dieser Arbeit eine TBC zugrunde gelegt.

Die Teilbandcodierung kann sowohl mit als auch ohne bewegungskompensierende Prädiktion eingesetzt werden. Teilbandcodierung *ohne* bewegungskompensierende Prädiktion verarbeitet als Eingangssignal der Analysefilterbank ein Originalsignal, bei der Teilbandcodierung *mit* bewegungskompensierender Prädiktion liegt stattdessen als Eingangssignal der Analysefilterbank ein Prädiktionsfehlersignal vor.

Die Teilbandcodierung ohne bewegungskompensierende Prädiktion verwendet i. allg. eine zweidimensionale örtliche Analyse- und Synthesefilterung [8] [13] [14] [31] [54]. Ein zu codierendes digitales Fernsehsignal wird der Analysefilterung unterzogen. Die Analysefilterbank setzt sich aus Teilbandfiltern mit anschließender Dezimation der Abtastwerte zusammen. Bei der Dezimation werden in regelmäßigen Abständen Abtastwerte ausgelassen, was einer reduzierten Abtastfrequenz der Teilbandsignale entspricht. Dabei können in den Teilbandsignalen Aliasinganteile entstehen. Bei der hier ausschließlich betrachteten sog. kritischen Dezimation ist die Gesamtanzahl der Abtastwerte aller Teilbandsignale am Ausgang der Analysefilterbank identisch mit der Anzahl der Abtastwerte des Eingangssignals. Die gefilterten und dezimierten Teilbandsignale werden quantisiert und codiert. Im Decoder werden die Teilbandsignale zuerst decodiert und anschließend der Synthesefilterbank zugeführt. Die Synthesefilterbank, bestehend aus Interpolation, Synthesefiltern und der Addition der gefilterten Teilbandsignale, rekonstruiert das Fernsehsignal. Bei Verwendung spezieller Filter [1] wird Aliasingkompensation erreicht, d.h. die durch Dezimation hervorgerufenen Aliasinganteile der Teilbandsignale werden in der Synthesefilterbank kompensiert, so daß eine perfekte Rekonstruktion des Eingangssignals möglich ist.

Eine Teilbandcodierung ohne bewegungskompensierende Prädiktion kann zwar die Redundanz innerhalb der Bilder reduzieren, jedoch nicht die Bild-zu-Bild-Redundanz. Erst eine Teilbandcodierung mit bewegungskompensierender Prädiktion [18] [41] [42] kann zusätzlich die Bild-zu-Bild-Redundanz reduzieren und erhöht so die Effizienz der Datenreduktion bei Bildsequenzen. Da die Teilbandcodierung hier ein Prädiktionsfehlersignal verarbeitet, ist die resultierende Datenrate umso geringer, je genauer die Prädiktion arbeitet.

Unter Eingangssignal wird in der gesamten Arbeit das der Analysefilterbank zugeführte Signal verstanden. Es kann als Originalsignal oder als Prädiktionsfehlersignal vorliegen, je nachdem ob eine Bewegungskompensation verwendet worden ist oder nicht.

Der Gewinn der Teilbandcodierung liegt darin, daß die Teilbandsignale effizienter codiert und übertragen werden können als das Eingangssignal. Die Irrelevanz wird durch eine teilbandindividuelle Quantisierung unterhalb der Sichtbarkeitsschwelle reduziert. Die Redundanz wird durch eine teilbandindividuelle, der Signalstatistik angepaßte Entropiecodierung reduziert. Für eine mathematische Behandlung wird die Signalstatistik durch ein Quellenmodell und die Sichtbarkeitsschwelle durch ein Empfängermodell beschrieben.

Bei vorgegebenem Quellen- und Empfängermodell hängt es von der Auslegung der Teilbandcodierung ab, inwieweit die Grenzen der Redundanz- und Irrelevanzreduktion erreicht werden. Wenn die Quantisierung der Teilbandsignale das Empfängermodell optimal ausnutzt, bestimmen die Form der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter und die Anzahl der Teilbandsignale die Höhe der Redundanz- und Irrelevanzreduktion. Die Optimierung der Analyse- und Synthesefilterbank unter Ausnutzung von Redundanz und Irrelevanz stellt daher ein zentrales Problem beim Entwurf einer Teilbandcodierung dar. Dieses Problem läßt sich aufspalten in die Bestimmung der optimalen Filterbankstruktur einerseits und in den Entwurf und die Optimierung der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter andererseits. Die Filterbankstruktur ist durch die Teilbandaufteilung, d.h. die Anzahl und Bandbreiten der Teilbandsignale sowie deren Lage im Frequenzbereich, und durch die Form der Realisierung dieser Bandaufteilung festgelegt.

Die Optimierung der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter von Zweibandssystemen wird in verschiedenen Publikationen behandelt. Grundlegende Arbeiten waren [21] [44] und [53], wo für Zweibandssysteme Teilbandfilter mit jeweils bestimmten Eigenschaften optimiert werden. Der Ansatz in [21] geht von linearphasigen Filtern mit Aliasingkompensation aus. Die dort verwendeten sogenannten Quadrature-Mirror-Filter (QMF) [12] erzeugen aber eine Amplitudenverzerrung der Gesamtübertragungsfunktion von Analyse- und Synthesefilterbank und besitzen daher nicht die Eigenschaft der exakten Rekonstruktion. In [44] werden die Übertragungsfunktionen von exakt rekonstruierenden nichtlinearphasigen FIR-Filtern mit Aliasingkompensation entworfen. Diese Filter werden als Conjugate Quadrature Filter (CQF) bezeichnet. Bei CQF sind die Betragsübertragungsfunktionen der beiden Bänder der Analysefilterbank identisch mit den Betragsübertragungsfunktionen der entsprechenden Bänder der Synthesefilterbank. CQF gehören zur Klasse der sogenannten orthogonalen Systeme. In [53] schließlich werden linearphasige exakt rekonstruierende Filter mit Aliasingkompensation entworfen. Hier unterscheidet sich die Übertragungsfunktion des Analysetiefpaß- bzw. -hochpaßfilters von der entsprechenden Übertragungsfunktion der Synthesefilterbank. In allen drei Arbeiten werden bei der Optimierung Übertragungsfunktionen mit möglichst kleinem Übergangsbereich angestrebt, so daß indirekt die Redundanzreduktion optimiert wird.

Speziell für die Bildcodierung werden erstmals in [22] und [32] die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter von Zweibandssystemen optimiert, so daß neben der Redundanzreduktion auch besondere Aspekte der visuellen Wahrnehmung berücksichtigt werden können. In diesen Arbeiten stützt sich das Empfängermodell allerdings nicht auf

die Sichtbarkeitsschwelle. In [22] werden zur Erreichung besonders niedriger Datenraten bei der Optimierung der Übertragungsfunktionen alle hochfrequenten Teilbandsignale unterdrückt. Die Filterkoeffizienten werden optimiert mit der Zielsetzung, die dadurch sichtbaren Fehler an Luminanzsprüngen subjektiv als möglichst wenig störend erscheinen zu lassen; hier wird also oberhalb der Sichtbarkeitsschwelle codiert. In [32] werden zur Erzielung einer hohen Irrelevanzreduktion die Codierfehler mit Hilfe des aus der analogen Fernsehtechnik bekannten k -Faktors [28] bewertet. Beide Ansätze versuchen neben der Reduktion der Irrelevanz eine möglichst hohe Redundanzreduktion durch einen möglichst kleinen Übergangsbereich der Übertragungsfunktionen zu erreichen, ohne ein Quellenmodell zu spezifizieren.

Eine andere Gruppe von Arbeiten [14] [23] [49] für die Bildcodierung gibt sich die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter und die Struktur der Filterbank fest vor und optimiert bei gegebener Filterbank die Irrelevanzreduktion durch Anpassung der Quantisierung an die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Sehens.

Auch für Mehrbandsysteme mit fest vorgegebener Struktur werden in verschiedenen Publikationen die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter hinsichtlich verschiedener Optimierungskriterien optimiert [37] [51] [52]. Der Einfluß der Filterbankstruktur und der Eigenschaften der Teilbandfilter auf die Redundanzreduktion werden erst in [11] und [47] in die Optimierung mit einbezogen. Dort werden für verschiedene gleichförmige Bandaufteilungen die Übertragungsfunktionen von Teilbandfiltern mit verschiedenen Eigenschaften optimiert mit dem Ziel, den durch Redundanzreduktion möglichen Codierungsgewinn zu maximieren.

Speziell für die Bildcodierung werden in [3] [10] und [46] Strukturen von Filterbänken untersucht. [3] und [10] geben sich die sog. Wavelet-Struktur [24] vor, die in diesen Arbeiten ohne formalen Beweis als besonders geeignet für die Irrelevanzreduktion angesehen wird. In [46] wird für eine gegebene Anzahl von Teilbandsignalen die im Hinblick auf Redundanzreduktion optimale ungleichförmige Bandaufteilung bestimmt. Dabei werden jedoch ideale Bandpässe angenommen. Die Übertragungsfunktionen realisierbarer Teilbandfilter werden also nicht berücksichtigt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für eine Teilbandcodierung die Filterbank so zu optimieren, daß die Gesamtdatenrate aller Teilbandsignale bei vorgegebenem Quellen- und Empfängermodell minimal wird. Durch das Quellenmodell ist die erreichbare Grenze der Redundanzreduktion vorgegeben; das Empfängermodell beschreibt die Sichtbarkeitsschwelle des zulässigen Codierfehlers und legt so die maximal mögliche Irrelevanzreduktion fest. Die Quantisierung der Teilbandsignale wird so gewählt, daß sie Redundanz und Irrelevanz optimal ausnutzt. Das Quellenmodell beschränkt sich in

dieser Arbeit auf die Berücksichtigung der linearen statistischen Bindungen. Sie werden durch die Autokorrelationsfunktion (AKF) bzw. die spektrale Leistungsdichte des Eingangssignals dargestellt. Das Empfängermodell dieser Arbeit berücksichtigt die örtliche Modulationsübertragungsfunktion (Modulation Transfer Function, MTF) des menschlichen Auges.

Die Freiheitsgrade der Optimierung bestehen in den Parametern zur Beschreibung der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter und den Parametern zur Beschreibung der Struktur der Filterbank. Die Teilbandquantisierer werden für jeden Parametersatz stets so ausgelegt, daß die Datenrate minimal wird. Die Parameter zur Beschreibung der Filterbankstruktur bestehen in der Anzahl der Teilbandsignale, ihren Bandbreiten und deren Lage im Frequenzbereich. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung des Quellen- und des Empfängermodells werden Redundanz- und Irrelevanzreduktion gemeinsam optimiert, so daß die minimale Datenrate erreicht werden kann.

In den oben zitierten Arbeiten werden jeweils nur Teilaspekte einer solchen Optimierung berücksichtigt. In [3] [10] [14] [21] [22] [23] [32] [44] [46] [49] [53] werden die Freiheitsgrade der Optimierung nicht vollständig ausgenutzt und in [3] [10] [11] [14] [21] [22] [23] [32] [37] [44] [46] [47] [49] [51] [52] [53] wird nur eines der Modelle, entweder das Quellen- oder das Empfängermodell spezifiziert, so daß eine optimale Ausnutzung von Redundanz und Irrelevanz nicht möglich ist.

Die minimale Gesamtdatenrate einer Teilbandcodierung kann mit Hilfe der Rate-Distortion-Theorie [4] berechnet werden. Sie wird theoretisch erreicht, indem Filter mit sehr kleinem Übergangsbereich in der Übertragungsfunktion und eine Teilbandaufteilung mit einer hinreichend großen Anzahl von Teilbandsignalen verwendet werden [26]. Außerdem muß die Quantisierung der Teilbandsignale an die MTF angepaßt sein. Dieser theoretische untere Grenzwert der Datenrate ist in der Realität aufgrund der endlichen Anzahl der Filterkoeffizienten und der endlichen Anzahl der Teilbandsignale nicht zu erreichen. Für jede vorgegebene Bandaufteilung mit begrenzter Anzahl von Teilbandsignalen läßt sich unter der Annahme verschwindend kleiner Übergangsbereiche in den Übertragungsfunktionen ein für diese Bandaufteilung gültiger unterer Grenzwert der Datenrate bestimmen. Diese Bestimmung ist für orthogonale Systeme unmittelbar möglich. Der entsprechende Grenzwert für beliebige, nicht notwendigerweise orthogonale Systeme wird in dieser Arbeit erstmals hergeleitet. Auch diese unteren Grenzwerte der Datenrate bei vorgegebener Bandaufteilung mit begrenzter Teilbandanzahl sind in der Realität aufgrund der endlichen Anzahl der Filterkoeffizienten nicht zu erreichen.

Werden die Anzahl der Filterkoeffizienten und die Anzahl der Teilbandsignale auf realisierbare Werte begrenzt, so beeinflussen die resultierenden Übertragungsfunktionen und die Filterbankstruktur den durch Redundanz- und Irrelevanzreduktion erzielbaren Gewinn. Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, führt eine Optimierung der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter im Hinblick auf eine hohe Redundanzreduktion zu anderen Einstellungen der Optimierungsparameter als eine Optimierung im Hinblick auf eine hohe Irrelevanzreduktion. Ebenso führt eine Optimierung der Struktur der Filterbank im Hinblick auf eine hohe Redundanzreduktion zu einem anderen Ergebnis als eine Optimierung im Hinblick auf eine hohe Irrelevanzreduktion. Die Optimierung der Teilbandcodierung unter *gleichzeitiger* Berücksichtigung der Redundanz- und Irrelevanzreduktion stellt das zentrale Problem dieser Arbeit dar.

Zur Optimierung der Filterbank muß der untere Grenzwert der Datenrate in Form der Rate-Distortion-Funktion aufgestellt werden. In die Rate-Distortion-Funktion müssen das vorgegebene Quellen- und Empfängermodell sowie die Freiheitsgrade der Optimierung eingehen. Diese Freiheitsgrade definieren die Filterkoeffizienten und die Filterbankstruktur. Desweiteren hängt die Quantisierung von diesen Freiheitsgraden ab. Die Optimierung der Freiheitsgrade ist wegen der Komplexität der Rate-Distortion-Funktion jedoch nicht in geschlossener Form lösbar. Daher werden in der vorliegenden Arbeit die Freiheitsgrade teilweise eingeschränkt. Da Einschränkungen der Freiheitsgrade das Ergebnis der Optimierung beeinträchtigen, muß in der Arbeit jeweils überprüft werden, ob die Einschränkung erlaubt ist.

Als erste Einschränkungen werden nur separierbare zweidimensionale Filter und Filterbänke mit der Eigenschaft der exakten Rekonstruktion betrachtet. Ferner werden nur solche Bandaufteilungen zugelassen, die sich auch durch wiederholte Anwendung einer Zweibandaufteilung darstellen lassen. Sämtliche Untersuchungen beschränken sich auf die Luminanzkomponente des Eingangssignals, lassen sich aber auf die Chrominanzkomponenten sinngemäß übertragen. Auch mit den bisher erwähnten Einschränkungen führt das Optimierungsproblem auf ein System nichtlinearer Gleichungen, die geschlossen nicht lösbar sind. Das Gleichungssystem ist aber auch einer numerischen Lösung aufgrund des Rechenaufwands nicht zugänglich. Daher müssen die Freiheitsgrade weiter eingeschränkt werden, wozu der folgende Lösungsansatz bestehend aus zwei Schritten verfolgt wird.

In einem ersten Schritt soll mit Hilfe einer Abschätzung die Lösungsmenge der möglichen Filterbankstrukturen eingeschränkt werden. Durch diese Abschätzung soll eine Teilmenge von Strukturen, die nicht die optimale Struktur beinhalten kann, erkannt und von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen werden. Für jede der in der

Lösungsmenge verbleibenden Filterbankstrukturen sollen in einem zweiten Schritt die Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter bei vorgegebener Anzahl der Filterkoeffizienten numerisch optimiert werden und abschließend das System mit minimaler Datenrate bestimmt werden.

Im nachfolgenden **Kapitel 2** wird die dieser Arbeit zugrundeliegende bewegungskompensierende Teilbandcodierung vorgestellt. Das verwendete Quellen- und Empfängermodell sowie die Modelle zur Beschreibung der Quantisierung und Codierung erläutert **Kapitel 3**. Desweiteren wird in Kapitel 3 der theoretische untere Grenzwert der Datenrate angegeben sowie die unteren Grenzwerte der Datenrate für orthogonale und beliebige Teilbandcodierungssysteme bei vorgegebener Teilbandanzahl hergeleitet. In **Kapitel 4** werden zuerst die Freiheitsgrade der Optimierung vorgestellt. Anschließend wird die Optimierung der Filterbankstruktur [34] sowie die der Übertragungsfunktionen der Teilbandfilter [33] behandelt. Zur ersten Bewertung der berechneten Ergebnisse werden die Datenraten der optimierten Filterbänke berechnet und mit den Grenzwerten aus Kapitel 3 verglichen. Inwieweit die Datenraten der Optimierung bei einer Realisierung erreichbar sind, zeigt die in **Kapitel 5** vorgestellte Simulation der berechneten Systeme anhand der gemessenen Ergebnisse. **Kapitel 6** vergleicht und bewertet die berechneten und gemessenen Ergebnisse aus den Kapiteln 4 und 5. Zur Bewertung der Ergebnisse wird darüberhinaus eine DCT-Codierung [36] in den Vergleich einbezogen.