

Vorwort

Seit der Begründung der Informations- und Codierungstheorie durch die Arbeiten von Claude E. Shannon sind fast fünf Jahrzehnte vergangen. In diesem Zeitraum hat sich die Kanalcodierung von einer rein theoretischen Disziplin zu einer ausgedehnten anwendungsorientierten Wissenschaft entwickelt. In fast allen modernen und leistungsfähigen Systemen zur Nachrichtenübertragung oder Nachrichtenspeicherung stellt die Kanalcodierung heute einen zentralen und prägenden Baustein dar. Mit der Compact Disc und mit Modems zur Datenübertragung dringen Codierungsverfahren inzwischen auch in die privat genutzte Elektronik vor.

Durch Kanalcodierung kann die Übertragungsqualität enorm gesteigert werden und gleichzeitig kommen die Übertragungsverfahren mit weniger Sendeleistung und teilweise auch mit weniger Bandbreite aus. Diese Vorteile müssen nicht mit einer Reduktion der Datenrate bezahlt werden, sondern nur mit einem erhöhten Aufwand an digitaler Signalverarbeitung in Sender und Empfänger. Die Codierungstheorie liefert Resultate zur Struktur und zu den Eigenschaften von Codes sowie effiziente und aufwandsgünstige Verfahren zur Decodierung. Zusammen mit der hochintegrierten Schaltungstechnik, die immer leistungsfähiger und kostengünstiger wird, führen die Fortschritte in der Kanalcodierung zu einer ständigen Weiterentwicklung der Übertragungsverfahren sowie zu einer effizienteren Nutzung der Übertragungskanäle.

Allerdings stellt die Kanalcodierung ein theoretisch außerordentlich schwieriges Gebiet dar, das sicherlich zu den anspruchsvollsten und faszinierendsten Disziplinen der Nachrichtentechnik wie auch der Informatik zählt. Das besondere Bedürfnis zur Darstellung der Grundlagen und Anwendungen der Kanalcodierung prägt sich in der Vielzahl von Lehrbüchern zu diesem Thema aus. Das Literaturverzeichnis weist fast 40 Bücher aus, die sich ausschließlich mit Kanalcodierung befassen, darunter auch einige Werke in deutscher Sprache. Viele Lehrbücher zur digitalen Übertragungstechnik enthalten ebenfalls ein in die Codierungstheorie einführendes Kapitel. Trotz dieser Vielzahl von Büchern, die sich in Umfang, Niveau und thematischen Schwerpunkten sehr unterscheiden, sehe ich durchaus die Notwendigkeit für ein weiteres Lehrbuch, das sich an folgenden Gesichtspunkten orientiert:

- Die beiden wichtigsten Codeklassen, nämlich Blockcodes einschließlich der hochentwickelten RS- und BCH-Codes mit ihrer komplexen mathematischen Struktur sowie Faltungs- und Trelliscodes in Verbindung mit digitalen Modu-

lationsverfahren und moderner Empfängertechnik, werden mit dem gleichen Gewicht behandelt.

- Von den vielen bekannten speziellen Codeklassen werden aus Platzgründen sowie zur besseren Übersicht nur sehr wenige dargestellt, diese aber sehr ausführlich. Neben den üblichen Kanalmodellen AWGN und BSC werden auch Kanäle mit Fading und Interferenz-Verzerrungen berücksichtigt.
- Verschiedene aktuelle Anwendungen der Kanalcodierung in den Bereichen Satellitenkommunikation, Modemtechnik, Mobilfunk, Richtfunk und Audiotchnik werden ausführlich erörtert.
- Bis auf wenige Ausnahmen werden alle Aussagen ausführlich und vollständig bewiesen. Dem besseren Verständnis komplizierter Zusammenhänge dient streckenweise das klassische Schema Definition-Satz-Beweis-Beispiel.

Der Text soll zum Selbststudium geeignet sein, und zwar sowohl für Studenten der Nachrichtentechnik, Informatik oder Mathematik wie auch für Entwicklungsingenieure, die mit dem Entwurf und der Implementierung von Nachrichtensystemen befaßt sind. Vorausgesetzt werden lediglich einige nachrichtentechnische Grundkenntnisse. Jedes Kapitel enthält eine Reihe von Übungsaufgaben, zu denen auch Lösungshinweise angegeben sind. Das Buch gliedert sich in vier Teile:

Teil I: Grundlagen (Kapitel 1 und 2): Zunächst werden die wichtigen Begriffe des diskreten Kanals, der Maximum-Likelihood-Decodierung und des asymptotischen Codierungsgewinns ausführlich erklärt. Eine Einführung in die Shannon'sche Informationstheorie fördert das Verständnis für die prinzipiellen Grenzen und Möglichkeiten der Kanalcodierung. Die Kanalkapazität und der R_0 -Wert werden für verschiedene Kanäle und Modulationsverfahren berechnet. Für den Spezialfall des binären symmetrischen Kanals werden das Shannon'sche Kanalcodierungstheorem und das R_0 -Theorem vollständig bewiesen.

Teil II: Blockcodes (Kapitel 3 bis 7): Die Beschreibung linearer Codes durch Matrizen und zyklischer Codes durch Polynome folgt der üblichen Darstellungsweise. Besondere Berücksichtigung finden die asymptotischen Schranken in Verbindung mit der Informationstheorie, die umfassende Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeit bei Hard- und Soft-Decision Decodierung sowie die Leistungsfähigkeit zyklischer Codes bei Kanälen mit Bündelfehlern. Die mathematischen Grundlagen werden grundsätzlich erst dort entwickelt, wo sie auch wirklich benötigt werden. Die Theorie der Galoisfelder wird in Kapitel 6 unter rechen-technischen Aspekten dargestellt, während im Anhang verschiedene mathematische Existenzbeweise und weitergehende Begriffsbildungen insbesondere bei Polynomringen im Vordergrund stehen.

Den ersten von zwei Schwerpunkten des Buches bilden die RS- und BCH-Codes, die in Kapitel 7 mit der modernen spektralen Beschreibung eingeführt werden. Durch Restriktion im Zeitbereich auf den Primkörper \mathbb{F}_p ergeben sich die BCH-Codes als Spezialfall der RS-Codes. Die Decodierung kann sowohl im Frequenz- wie im Zeitbereich stattfinden, wobei die Lösung der Schlüssel-

gleichung sowohl mit dem Berlekamp-Massey wie mit dem Euklidischen Algorithmus erfolgen kann. Auch die RS-Decodierung bei Kanälen mit Fehlern und Ausfällen sowie die Decodierung binärer BCH-Codes werden ausführlich behandelt.

Teil III: Faltungscodes und Trelliscodes (Kapitel 8 bis 10): Aufgrund des Prinzips der Punktierung erscheint es sinnvoll, binäre Faltungscodes nur mit der Coderate $R = 1/n$ zu betrachten. Die Beschreibung mit dem Trellisdiagramm bildet die Grundlage für die Maximum-Likelihood Decodierung mit dem Viterbi-Algorithmus, während das Zustandsdiagramm die Berechnung der Distanzeigenschaften und der Fehlerwahrscheinlichkeit ermöglicht. Mit RCPC-Codes und Soft-Output Decodierung werden aktuelle Entwicklungen berücksichtigt, die für verschiedene Anwendungen von zentraler Bedeutung sind.

Die Verfahren der sogenannten klassischen Kanalcodierung mit Block- und Faltungscodes sind zwar leistungseffizient, erfordern aber üblicherweise eine Expansion der Bandbreite. Dagegen ermöglicht die trelliscodierte Modulation in Verbindung mit höherstufigen digitalen Modulationsverfahren nicht nur leistungseffiziente, sondern auch bandbreiteneffiziente Übertragungsverfahren. Wegen der enormen Bedeutung bilden diese Methoden den zweiten großen Schwerpunkt des Buches. Neben den seit 1982 bekannten Ungerböck-Codes werden auch rotationsinvariante, mehrdimensionale, mehrstufige, blockcodierte und pragmatische TCM-Verfahren behandelt.

Teil IV: Ergänzungen und Anwendungen (Kapitel 11 und 12): Bei vielen Anwendungen liegen Fadingkanäle vor, für die geeignete Interleaving-Verfahren sowie Blockcodes und trelliscodierte Modulation diskutiert werden. Der Viterbi-Algorithmus erweist sich bei allen Systemen mit Trellisstruktur als attraktive Methode zur ML-Decodierung, als Beispiele werden die Entzerrung von Kanäle mit Intersymbol-Interferenzen, der optimale Empfänger bei Continuous Phase Modulation sowie die Soft-Decision Decodierung von Blockcodes betrachtet. Mit Produktcodes und der Summenkonstruktion können leistungsfähige Blockcodes aus einfachen Blockcodes generiert werden. Verschiedene Beispiele verdeutlichen die überragende Bedeutung des Prinzips der Codeverketzung.

Die eindrucksvolle Vielfalt der bei modernen Kommunikationssystemen eingesetzten Codierungsverfahren mit der jeweiligen Anpassung an die Kanaleigenschaften illustrieren verschiedene Anwendungen wie die Satellitenkommunikation bei erdfernen Forschungssatelliten, Modems für den Telefonkanal, digitale Mobilfunksysteme der heutigen und der zukünftigen Generation, digitale Breitband-Richtfunksysteme sowie die Nachrichtenspeicherung bei der Compact Disc.

Manche Lehrbücher zur Codierungs- und Informationstheorie sind nach meiner Auffassung entweder zu theoretisch geschrieben ohne die ingenieurmäßigen Probleme bei der Anwendung ausreichend zu berücksichtigen oder andererseits zu sehr anwendungsorientiert mit Vernachlässigung des mathematischen Hintergrundes. Mit diesem Buch wird ein einigermaßen ausgewogener Kompro-

miß zwischen Theorie und Anwendung angestrebt. Im Rahmen meiner Tätigkeit bei Bosch Telecom (vormals ANT Nachrichtentechnik) konnte ich über etliche Jahre hinweg Erfahrungen bei der Entwicklung und Implementierung codierter Übertragungssysteme sammeln.

Das Buch ist aus Unterlagen zu Kursen hervorgegangen, die ich seit längerer Zeit im Rahmen des Weiterbildungsprogramms meiner Firma veranstalte. Hinzu kommt die Vorlesung *Verfahren zur Kanalcodierung*, die ich seit 1993 an der Universität Karlsruhe für Studenten der Nachrichtentechnik im 8. Semester sowie für Informatiker und Mathematiker halte. Aus Zeitgründen kann in der Vorlesung allerdings nur etwa ein Drittel des Stoffes aus dem Buch behandelt werden.

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen Personen danken, die mir bei der Erstellung des Buches behilflich waren. Zunächst geht mein Dank an Herrn Prof. F. Jondral vom Lehrstuhl für Nachrichtensysteme der Universität Karlsruhe, der die Vorlesung angeregt und gefördert hat, sowie an seinen Mitarbeiter Herrn G. Wetzker, der große Teile des Manuskriptes zweimal auf Fehler durchgesehen hat und mir dabei unzählige Hinweise zur Verbesserung der Darstellung gegeben hat. Viele Ratschläge verdanke ich auch Herrn Prof. D. Lazic vom Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme. Die Hörer meiner Vorlesung in Karlsruhe und die Teilnehmer an meinen Kursen in Backnang haben zu der Arbeit mit Fragen, Anregungen und Verbesserungsvorschlägen wesentlich beigetragen.

Bei meinen Kollegen bedanke ich mich für vielerlei Unterstützung, insbesondere bei den Herren Dr. M. Welzenbach, Dr. W. Hauk und Dr. V. Hespelt für die immer kreative und stimulierende Atmosphäre. Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Kollegen P. Herbig für zahllose anregende Diskussionen, für die fachliche Unterstützung insbesondere beim TCM-Kapitel, sowie für die Durchsicht der Aufgaben und das Korrekturlesen. Herr H. Erchinger stand mir bei \LaTeX nischen Problemen zur Seite. Frau M. Schuler hat mit großer Sorgfalt alle Interleaf-Bilder angefertigt.

Nicht zuletzt geht der Dank an meine Eltern, die mit viel Engagement einen scheinbar kryptischen Text auf sprachliche Mängel durchgesehen haben.

Den Herausgebern Prof. H. Marko und Prof. J. Hagenauer danke ich für die Aufnahme des Buches in die Reihe „Information und Kommunikation“. Schließlich bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Springer-Verlages, insbesondere bei Herrn Dr. D. Merkle, für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Bernd Friedrichs

Backnang, im Juli 1995