

# Faltungscodierung in WSPR

## Wie funktioniert das?

# Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	3
1.1 Kurze Beschreibung von WSPR.....	3
2. Kodierer.....	3
2.1 Wirkungsprinzip des Blockkodierers.....	3
2.2 Wirkungsprinzip des Faltungscodierers.....	4
3. Der Faltungskodierer.....	4
3.1 Darstellung des Faltungskodierers mit einem Graphen.....	4
3.2 Darstellung des Faltungskodierers mit einer Liste.....	6
4. Die Dekodierung mit dem Viterbi-Dekoder.....	8
4.1 Dekodierung bei fehlerfreier Übertragung.....	8
4.2 Dekodierung bei Übertragungsfehlern.....	9
4.3 Mögliche Probleme bei der Dekodierung.....	10
5. Der Rechenaufwand.....	10
6. Katastrophale Codes.....	10

## 1. Vorwort

Viele haben schon Erfahrung mit dem Weak Signal Reporting System (WSPR) gemacht und waren darüber erstaunt mit welcher geringen Leistungen es möglich ist über sehr große Entfernungen Nachrichten fehlerfrei zu übertragen. Eine Reihe von Funkamateuren hat zumindest die Sendeseite des WSPR Verfahrens nachprogrammiert. Für einen Teil der OMs, die das Verfahren erfolgreich nachprogrammieren konnten, bleibt aber die Frage offen, warum die Kodierung genau so gemacht wurde wie sie ist, und wie sie genau funktioniert.

Bei der Suche nach Erklärungen im Internet verliert man sich leider schnell in hochtheoretischen Erörterungen die sicher umfassend und korrekt sind, die grundlegenden Ideen des Verfahrens für den der nach greifbaren Antworten sucht, aber oft im Dunkeln bleiben. Hier soll versucht werden genau diese Ideen ohne theoretischen Ballast vorzustellen.

### 1.1 Kurze Beschreibung von WSPR

Beim WSPR wird ein Träger ausgesendet, der im 0,6s-Abstand bis zu  $3 \times 1,46$  Hz verschoben wird. Eine Übertragung dauert etwa 110s. Die empfangenden Stationen senden ihre Empfangsrapporte in Echtzeit an einen zentralen Server. Vor dort kann dann z.B. eine Karte abgerufen werden in der die Empfänger eines WSPR-Senders angezeigt werden. Wegen der sehr ausgefeilten Fehlerkorrektur reichen zum Senden über sehr große Strecken kleinste Leitungen bis in den Milliwattbereich.

Im WSPR wird neben der Faltungscodierung ein ganzer Strauß von weiteren Verfahren eingesetzt um die gewünschten Nachrichten zu übertragen (Datenkomprimierung, Verwürfelung (Interleaving), Syncvektor).

Hier soll es aber nur um die Faltungscodierung und die Dekodierung dieses Codes gehen.

## 2. Kodierer

Mit Hilfe von Kodierern kann einem Datenstrom Zusatzinformation hinzugefügt werden, mit deren Hilfe es dem Empfänger möglich wird auch bei gestörter Übertragung die Originalnachricht zu rekonstruieren. Dafür, wie das gemacht wird, gibt es zwei unterschiedliche Verfahren.

### 2.1 Wirkungsprinzip des Blockkodierers

Dabei wird der Datenstrom in kleine Blöckchen zerhackt und an jeden Block der Originaldaten ein Block mit Sicherungsdaten gehängt. So etwas passiert z.B. bei dem allseits bekannten QR-Code. Hier kann man bei fehlerfreier Übertragung die Nutzdaten wieder zu einem Datenstrom zusammensetzen ohne die Sicherungsdaten zu benötigen.

## Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

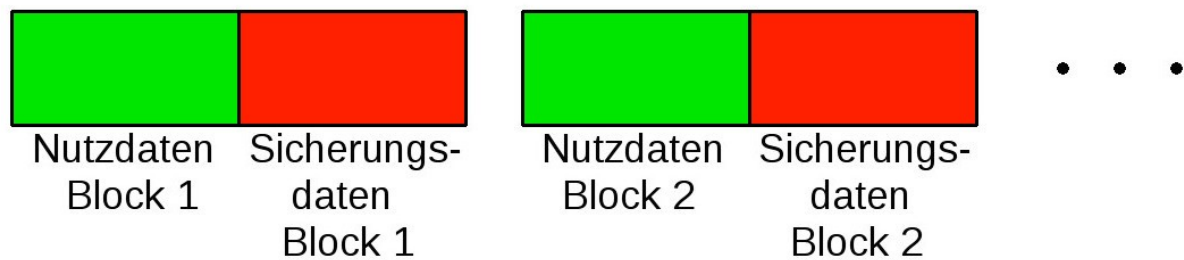


Bild 1: Struktur der Ergebnisdaten einer Blockkodierung

### 2.2 Wirkungsprinzip des Faltungscodierers

Bei der Faltungscodierung wird der Datenstrom durch eine Kette logischer Operationen (Schieberegister, Exklusiv-Oder) geschickt auf auf diese Weise „mit sich selbst“ kodiert. Dieses Verfahren wird z.B. bei QPSK31 und WSPR verwendet.

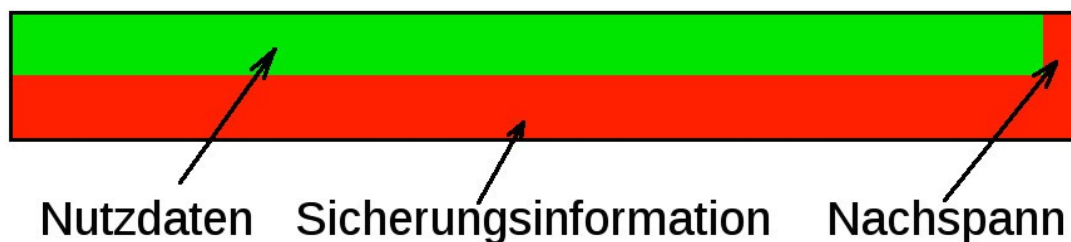


Bild 2: Struktur der Ergebnisdaten einer Faltungscodierung

## 3. Der Faltungscodierer

### 3.1 Darstellung des Faltungscodierers mit einem Graphen

Die Faltungscodierung wird gerne in Form von Graphen dargestellt aus denen man Schritt für Schritt nachverfolgen kann, wie die Ergebnisse entstehen. Hier soll ein solcher Graph gezeigt werden, der für die Faltungscodierung im Verfahren QPSK31 benutzt wird. Er ist mit seinen 4 Bit Länge viel einfacher als der mit 32 Bit Länge bei WSPR. Dabei stehen die quadratischen Kästchen für 1-Bit Speicherzellen die in einer Kette angeordnet als Schieberegister dienen. Die Kästchen mit den „+“-Zeichen sind Exklusiv-Oder-Gatter und das mit -1 bezeichnete Kästchen ist ein Inverter der aus „1“ eine „0“ macht und umgekehrt. Der Schalter ist dazu da, dass für jedes Eingangsbit zwei Ausgangsbits abgeholt werden können. Diese 2-Bit Blöcke werden auch als „Symbole“ bezeichnet.

### Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

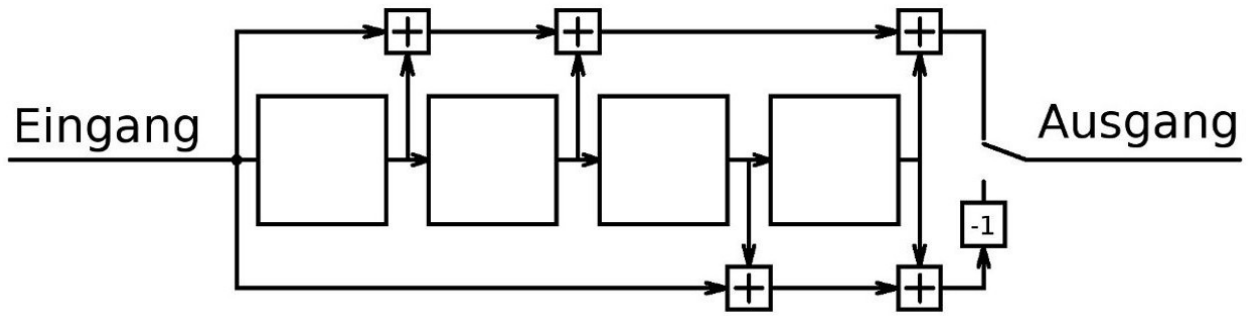


Bild 3: 4 Bit Faltungskodierer für QPSK31

Obwohl die Struktur verhältnismäßig einfach aussieht, sind die unterlagerten Grundprinzipien der Kodierung nicht zu erkennen. Noch weit komplexer ist die 32-Bit Kodierung aus wie sie bei WSPR Anwendung findet:

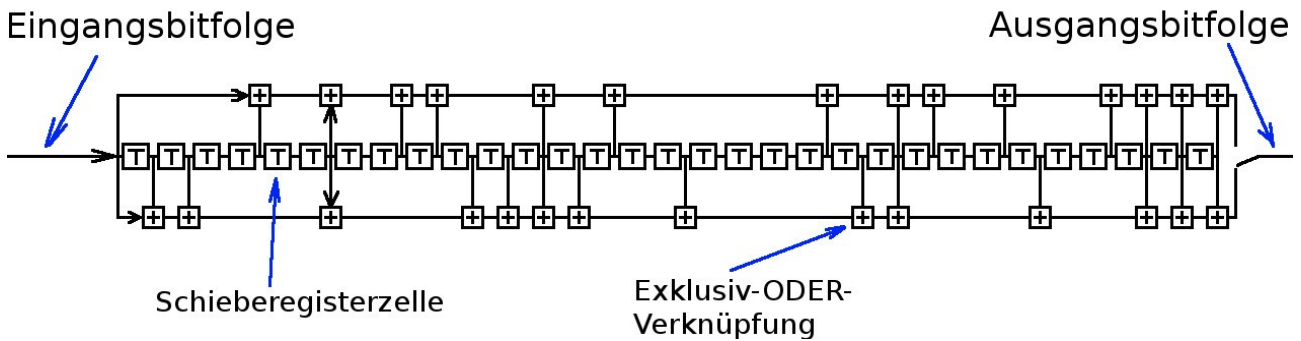


Bild 4: 32 Bit Faltungscodierer für WSPR

Deshalb wollen wir mit einer ganz anderen Darstellung beginnen.

### 3.2 Darstellung des Faltungskodierers mit einer Liste

Allen diesen Kodierungen ist ein Schieberegister gemeinsam dessen Anzahl von Zellen die Bitanzahl der Kodierung bestimmt. Man kann sich die Kodierung auch so vorstellen dass der Inhalt dieser Schieberegister die Art der Kodierung vorgibt, die Verschlüsselung also direkt mit dem augenblicklichen Inhalt des Schieberegisters zusammenhängt. Nach dem Senden der Nachricht wird das übertragene Bit in das Schieberegister geschoben und die nächste Kodierung erfolgt anhand des neuen Schieberegisterinhalts.

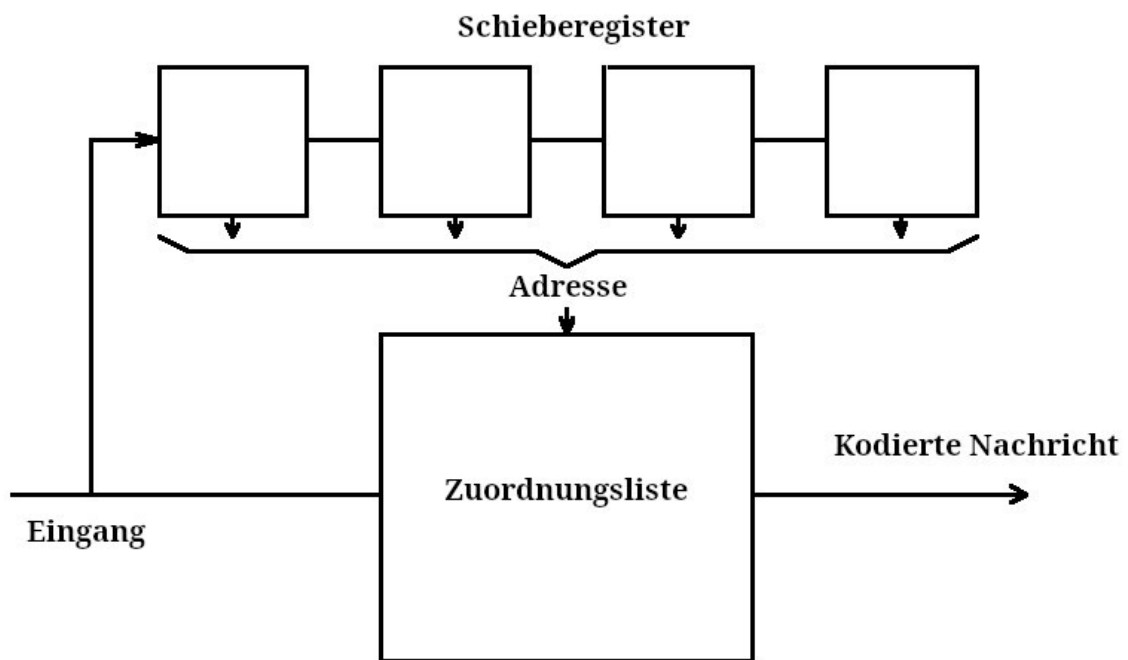


Bild 5: Eine andere Darstellung der Struktur des 4-Bit Kodierers.

Die Schritte der Kodierung sehen damit so aus:

- Vor dem Beginn der Kodierung werden alle Zellen des Schieberegisters auf „0“ gesetzt.
- Der aktuelle Inhalt des Schieberegisters wird als Adresse in einer Tabelle interpretiert unter der hinterlegt ist wie eine „0“ oder eine „1“ zu kodieren ist.
- Entsprechend der Listeninformation wird die zu kodierende Eingangsinformation (eine „0“ oder eine „1“) kodiert (Ergebnis: 00, 01, 10 oder 11).
- Das Ergebnis wird ausgegeben und das kodierte Eingangsbit wird in das Schieberegister geschoben.
- Ist die gesamte Nachricht durchgelaufen, werden noch so viele „0“ nachgeschoben und kodiert wie das Schieberegister Stellen hat. Dieser „Nachspann“ ist notwendig später auch

## Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

die letzten Bits des Datenstroms mit derselben „Sicherheit“ dekodieren zu können wie die davor.

### Tabelle der Kodierergebnisse abhängig vom Registerinhalt

Registerinhalt	Ergebnis der Kodierung einer "0"	Ergebnis derKodierung einer "1"
0	01	10
1	10	01
2	00	11
3	00	11
4	11	00
5	00	11
6	10	01
7	01	10
8	11	00
9	00	11
10	10	01
11	01	10
12	01	10
13	10	01
14	00	11
15	11	00

Tabelle 1: Die Tabelle die bei QPSK31 benutzt wird.

Die in Bild 3 gezeigte Struktur erzeugt genau die Liste, die in Tabelle 1 zu sehen ist. Für Implementierungen wie bei QPSK31 kann man also anstatt der Struktur aus Bild 3 auch die Liste aus Tabelle 1 nehmen. Mit steigender Bitzahl wird eine solche Liste aber schnell größer. Bei QPSK31 sind es nur 4 Bit, die Tabelle enthält also 16 Einträge. Bei WSPR ist die Bitzahl aber 32, die zugehörige Tabelle bräuchte aber  $2^{32} = 4294967296$  Zellen also eine Zahl die unhandlich riesig ist. Deshalb benutzt man anstatt der Zuordnungslisten Generatorstrukturen wie die in den Bildern 3 und 4 dargestellt.

#### Zusammenfassung

Wenngleich nicht direkt ersichtlich ist warum die Kodierung in dieser Art durchgeführt wird ist es zumindest nachvollziehbar, dass die Information eines jeden zu übertragenden Bits jetzt nicht nur in **einem** Ergebnisbit (oder genauer Ergebnissymbol) steckt, sondern auf **mehrere** Ergebnissymbole verteilt ist. Diese Verteilung der Information kann genutzt werden um auch bei Übertragungsfehlern die ursprüngliche Nachricht zu restaurieren.

Im Gegensatz zu Blockcodes ist es hier auch bei fehlerfreier Übertragung nicht möglich die Originaldaten aus dem Datenstrom direkt auszulesen.

## 4. Die Dekodierung mit dem Viterbi-Dekoder

Der erste Faltungscodierung wurde 1955 von Peter Elias beschrieben. Erst 12 Jahre später veröffentlichte Andrew Viterbi ein effektives Verfahren zur Dekodierung von Faltungscodes. Schon daraus ist erkennbar, dass sich nur aufgrund der Beschreibung der Faltungscodierung direkt kein Verfahren zur Dekodierung ergibt.

### 4.1 Dekodierung bei fehlerfreier Übertragung

Bei fehlerfreier Übertragung ist die Dekodierung des Datenstroms trivial. Um beim Bild mit der Zuordnungsliste zu bleiben, sieht man beim ersten Symbol in der Zuordnungsliste unter der Adresse 0 nach. Das dort gefundene Ergebnis ist dann schon die gesuchte Information. Das übertragene Ergebnisbit schiebt man dann in das Schieberegister und hat damit die Adresse für die Dekodierung des nächsten Bits. So lange keine Fehler auftreten, sind die Schieberegisterinhalte auf Sender- und Empfängerseite gleich. Der Empfänger weiß also zu jedem Zeitpunkt mit welcher Adresse der Sender seine Information kodiert hat.

Um sich ein Bild von den Vorgängen im Empfänger machen zu können, benutzt man gerne ein spezielles Diagramm. Das Trellis-Diagramm. In diesem Diagramm wird für jede Schieberegisteradresse eine waagerechte Linie gezeichnet und je eine senkrechte Linie für jeden Übertragungsschritt. Würde man in unserem 4-Bit Kodierer das Bitmuster 1010 fehlerfrei übertragen, würde das im Trellis-Diagramm so aussehen:

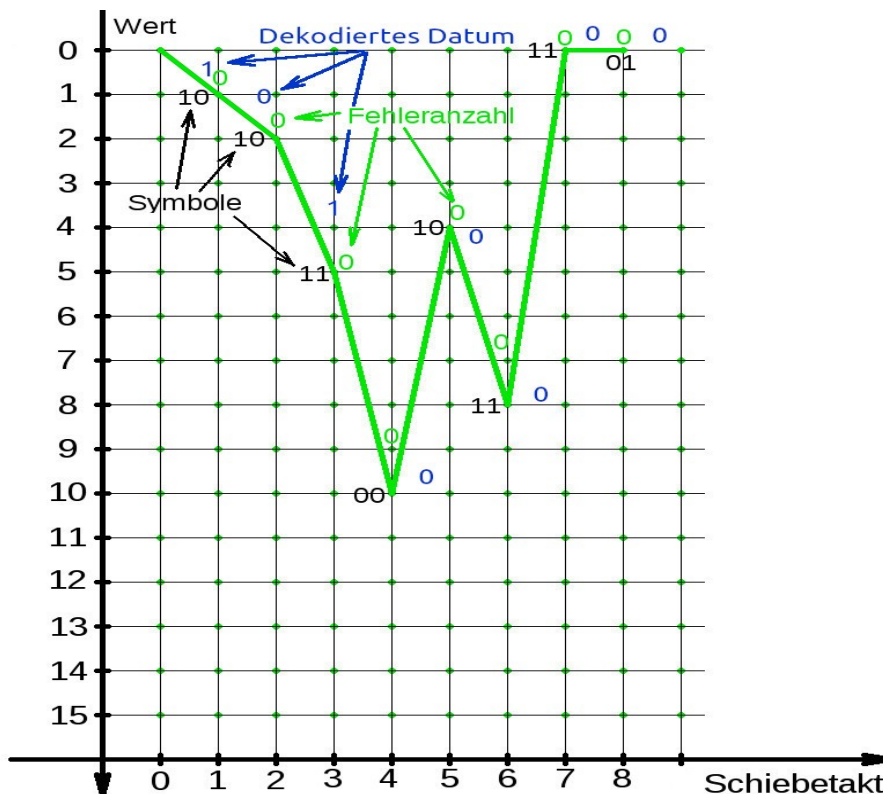


Bild 3: Trellis-Diagramm einer fehlerfreien Übertragung von 0000 0101 oder dem fehlerfreien Empfang der Symbole 10 10 11 00 10 11 11 01

## Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

Verbindet man die Punkte die die Registerinhalte zu den verschiedenen Zeitpunkten darstellen, so entsteht eine Zickzacklinie die als „Pfad“ bezeichnet wird.

### 4.2 Dekodierung bei Übertragungsfehlern

Tritt z.B. bei der Übertragung des dritten Symbols ein Bitfehler auf (im Beispiel 10 anstatt 11), erkennt der Dekoder diesen einen Fehler, weil dadurch ein Symbol entsteht das unter der aktuellen Listenadresse (also beim aktuellen Schieberegisterinhalt) nicht existiert. Jetzt ist aber nicht klar, ob eine „0“ oder eine „1“ hätte übertragen werden sollen. Der Dekoder spaltet den Pfad deshalb auf, einen bei dem eine empfangene „0“ und einen bei dem eine empfangene „1“ vermutet wird. Diese beiden Pfade werden außerdem mit einer „1“ markiert, weil beim Empfang ein Fehler erkannt wurde.

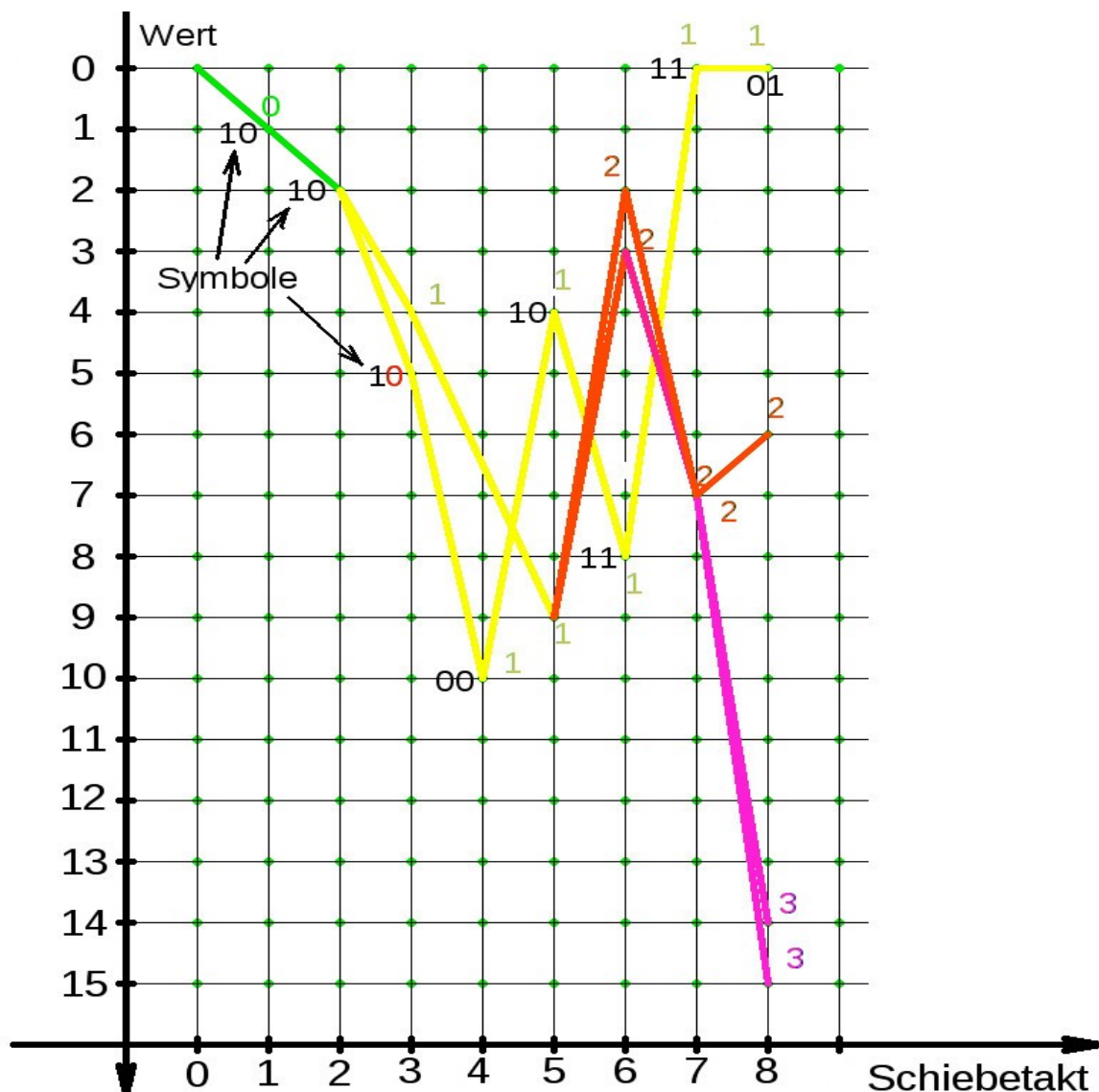


Bild 4: Beispiel eines Trellis-Diagramms mit dem fehlerhaften Empfang von 10 im 3. Symbol anstatt 11

## Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

In unserem Beispiel gehen wir davon aus, dass die nächsten Symbole alle fehlerfrei übertragen werden. Diese weiteren Übertragungen führen dazu, dass es bei dem Pfad bei dem man im Fehlerfall den richtigen Wert vermutet hatte, keine weiteren Fehler mehr detektiert werden denn die Schieberegister auf der Sende- und Empfangsseite sind synchron. Beim Pfad bei dem der falsche Wert angenommen wurde, wird die Fehlerzahl weiter steigen denn die Schieberegisterinhalte sind nicht mehr synchron. Das führt außerdem zu weiteren Aufspaltungen des Pfades. Am Ende der Übertragung hat man schließlich ein ganzes Bündel von Pfaden. In unserem Fall 4 Pfade, einen mit Fehlerzahl 1, einem mit Fehlerzahl 2 und zwei mit Fehlerzahl 3. Der mit der niedrigsten Fehlerzahl gibt dann mit der größten Wahrscheinlichkeit die korrekte Information wieder.

### 4.3 Mögliche Probleme bei der Dekodierung

Bei Einzelbitfehlern funktioniert die Rekonstruktion der Originalnachricht recht gut. Problematisch wird es, wenn zwei hintereinander liegende Bits fehlerhaft übertragen wurden. Wenn man von den möglichen Symbolen 00, 01, 10 und 11 ausgeht, und nur die Kombinationen 01/10 sowie 00/11 zulässt, so führt ein Einzelbitfehler von einer erlaubten Kombination in die jeweils andere, was vom Dekoder erkannt werden kann. Gibt es aber zwei Fehler direkt hintereinander, so wird z.B. aus 01 die 10 oder aus 00 die 11. Das wird vom Dekoder dann nicht mehr erkannt und die Schieberegisterinhalte laufen auseinander obwohl kein Fehler detektiert wurde. Eine mögliche Maßnahme um solche Fehler zu vermeiden ist die, dass man logisch hintereinanderliegende Bits so umsortiert, dass sie zeitlich nicht hintereinander liegen.

## 5. Der Rechenaufwand

Auf der Sendeseite ist der Rechenaufwand auch bei langen Kodierungen (wie den 32 Bits für WSPR) gering. Auf der Empfangsseite sieht es anders aus. Treten Übertragungsfehler auf, verästelt sich der Pfad im Trellis-Diagramm. Nach einem Fehler sind im nächsten Schritt zwei Pfade zu bearbeiten, im Schritt drauf in der Hälfte der Fälle schon drei. Diese Verästelung wird sehr schnell größer und größer. Bei 4 Bit kann es maximal 16 Pfade geben, bei 32 Bit über 4 Milliarden. Für die Bearbeitung müssen also Kriterien definiert werden aufgrund derer entschieden werden muss, wann ein Pfad nicht mehr weiter verfolgt wird. Diese Kriterien beeinflussen dann aber auch die Tiefe mit der man versucht die Originalnachricht zu rekonstruieren.

## 6. Katastrophale Codes

Die Zuordnungslisten und damit die Generatorstrukturen können nicht beliebig sein denn es gibt eine große Zahl von Kombinationen die keine effektive Rekonstruktion mehr erlauben. Einige Kombinationen sind mit unseren 2-Bit Symbolen ganz offensichtlich

Eine „0“ mit 00 zu kodieren und eine „1“ ebenso mit „00“ führt natürlich dazu, dass man von der „00“ nicht mehr auf die ursprüngliche Nachricht zurückschließen kann. Generell müssen „0“ und „1“ durch unterschiedliche Symbole kodiert werden.

Kodiert man eine „0“ mit 00 und eine „1“ mit 01, dann funktioniert Kodierung und Dekodierung solange kein Übertragungsfehler auftritt. Ein einzelner Bitfehler kann aus einer 01 aber eine 00 machen was im Dekoder zu großen Problemen führt denn in diesem Fall wird kein Fehler erkannt,

## Faltungscodierung in WSPR – wie funktioniert das?

die Schieberegisterinhalte sind aber nicht mehr synchron. Generell müssen die Symbole den größtmöglichen Hamming-Abstand haben. In unserem 2-Bit-Fall sind also nur die Kombinationen 01/10 und 00/11 möglich.

Bei nur 2 Bit langen Symbolen und den damit möglichen gültigen Kombinationen ist der nächste Punkt nicht überall einzuhalten. Die Fehlererkennung wird effektiver wenn sich die Symbole der geraden Adressen von denen der drauf folgenden ungeraden Adressen unterscheiden denn nur in dem Fall wirkt die Fehlererkennung wegen nicht synchroner Schieberegister gleich beim nächsten empfangenen Symbol.