



# Decodierung von Faltungscode- und Turbo-code-basierten 2D-Barcodes unter Ausnutzung des Matched-Filter Ansatzes

Andreas Weinand<sup>1</sup>, Wolfgang Sauer-Greff<sup>2</sup>, Hans D. Schotten<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Funkkommunikation und Navigation

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Nachrichtentechnik

TU Kaiserslautern

08.05.2015

20. VDE/ITG Fachtagung Mobilkommunikation, Osnabrück



# Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Kanalcodierung
  - Reed-Solomon-Codes
  - Faltungscodes
  - Turbocodes
- 3 2D-Barcodes
  - Erzeugung von 2D-Barcodes
  - Kanalmodelle
  - Detektion & Decodierung
- 4 Auswertung
  - Matched-Filter-Detektion
  - AWGN-Kanal
  - Blockfehlerbehafteter Kanal
- 5 Zusammenfassung



# Einleitung

## 2D-Barcodes

- Auslesen von optisch dargestellten Informationen durch computerbasierte Systeme ohne menschliche Interaktion
- Eindeutige Identifikation von Objekten, u. a. in der Industrie  
→ intelligente Produktionsstraßen
- Authentifizierungsmechanismen für Mensch-Maschine-Schnittstellen
- DV-Freimachung, Ticketing, Paket Tracking
- Prinzipieller Aufbau:
  - Quadratische oder ähnliche geometrische Formen
  - Formen repräsentieren in der Regel binäre Symbole
  - Synchronisationsmuster zur Detektion
- Aufbringung durch Nadelprägung, hochauflösende Tintenstrahldrucker, Laser oder elektrochemisches Ätzen



# Einleitung

## Data-Matrix-Code

- Barcodes in dieser Arbeit basieren auf Data-Matrix-Code
- Standardisiert in ISO/IEC 16022:2006
- Variante mit Fehlerkorrektur basierend auf Reed-Solomon-Codes (aktuelle Anwendungen)
- Variante mit Fehlerkorrektur basierend auf Faltungscodes (veraltet)
- Faltungsdecodierer kann ohne signifikanten Mehraufwand auch Soft-Input verarbeiten
  - ▶ Detektionsverfahren zur Erzeugung von Soft-Input verwenden, um Fehlerkorrekturfähigkeit von Faltungscode-basierten Barcodes gegenüber Reed-Solomon-Code-basierten Barcodes zu verbessern
- Zusätzlich Untersuchung des Einflusses von Turbocodes auf die Fehlerkorrekturfähigkeit



# Kanalcodierung

## Reed-Solomon-Codes

- Zyklische Codes
- Galois-Feld-Arithmetik ( $GF(q^m)$ )
- als Polynom oder Vektor darstellbar
- Systematische Encodierung
  - Informationswort:  $\mathbf{m} = [m_0, \dots, m_{k-1}]$
  - Redundanzstellen:  $d(x) = x^{n-k} m(x) \bmod g(x)$
  - Codewort:  $\mathbf{c} = [m_0, \dots, m_{k-1}, d_0, \dots, d_{n-k-1}] = [\mathbf{m}|\mathbf{d}]$
- $t$  Fehler korrigierender Code hat  $n - k = r = 2t$  Redundanzstellen
- Generatorpolynom:  $g(x) = (x - \alpha^b)(x - \alpha^{b+1}) \dots (x - \alpha^{b+2t-1})$
- Decodierung mit Berlekamp-Massey-Algorithmus
- $t$  oder weniger Fehlerstellen  $\rightarrow$  Fehlerwerte können berechnet werden



# Kanalcodierung

## Faltungscodes

- Encodierung entspricht Filterung/Faltung
- Realisierung durch Schieberegisterschaltung mit GF(2)-Arithmetik
- $k$  Eingangssymbole pro Takt:  $\mathbf{m}(x) = [m^{(1)}(x), \dots, m^{(k)}(x)]$
- Ausgabe von  $n$  Codesymbolen:  $\mathbf{c}(x) = [c^{(1)}(x), \dots, c^{(n)}(x)] = \mathbf{m}(x)G(x)$

$$G(x) = \begin{bmatrix} g^{(1,1)}(x) & \dots & g^{(1,n)}(x) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g^{(k,1)}(x) & \dots & g^{(k,n)}(x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

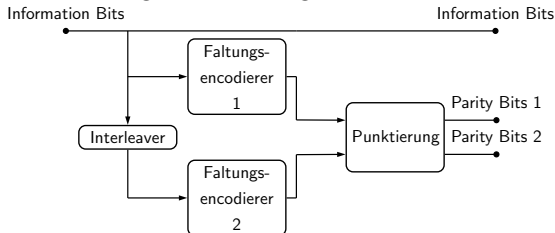
- Decodierung mittels MLSE (optimal hinsichtlich min. Bitfehlerrate)
  - Suche nach kürzestem Pfad im Trellis
  - realisiert durch Viterbi-Algorithmus (optimal bei AWGN)  $\rightarrow$  Euklidische Distanz ( $\| \cdot \|^2$ )



# Kanalcodierung

## Turbocodes

- Über Interleaver parallel verkettete Faltungencodierer
- Einzelne Encodierer in der Regel systematisch und rekursiv
- Einsatz von Punktierung zur Erhöhung der Coderate

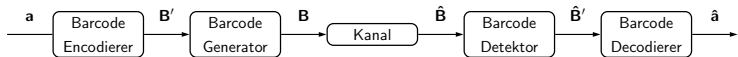


- Decodierung über SISO-Decodierer (soft-input-soft-output) mit iterativem Austausch von Zuverlässigkeitsinformationen
- Zuverlässigkeitsinformation: LLR (Log-Likelihood-Ratio)

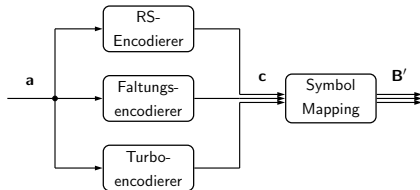


## 2D-Barcodes

### Erzeugung von 2D-Barcodes



- $a$  ist Folge von ASCII Zeichen (erweiterter Satz, 8 Bit/Zeichen)
- codierte Symbolfolge  $c$  wird durch Symbolplatzierungsalgorithmus auf Barcodedatenmatrix  $B'$  gemappt
- $B$  ist der endgültige Barcode mit Synchronisationsmuster und angepasster Modulgröße (Pixelwiederholung)







# 2D-Barcodes

## Fehlerkorrektur

- Reed-Solomon-Code-basierte Barcodes
  - $(255, 255 - 2t)$ -Reed-Solomon-Code über  $GF(2^8)$
  - primitives Polynom:  $p(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
  - Generatorpolynom mit  $\alpha = 2$ ,  $b = 1$ :  $g(x) = (x - 2^1)(x - 2^2) \cdots (x - 2^r)$
  - Symbolplatzierungsalgorithmus ordnet Bits der Symbole blockweise an
- Faltungscodierungsbasierte Barcodes
  - Coderate  $R = 1/2$ ,  $G = \begin{bmatrix} 123741 & 155027 \end{bmatrix}_8$
  - Symbolplatzierungsalgorithmus ordnet benachbarte Bits möglichst weit weg voneinander an
- Turbo-codierungsbasierte Barcodes
  - $G(x) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1+x+x^3}{1+x^2+x^3} \end{bmatrix}$
  - Standard UMTS/LTE Interleaver
  - Punktierungsmatrix für Coderate  $R = 1/2$ :  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

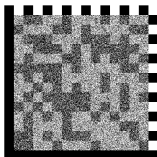


## 2D-Barcodes

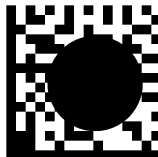
### Kanalmodelle

- AWGN-Kanal
  - Überlagerung von Pixeln mit weißen, gaußverteilten Störwerten  
→  $\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{B} + \mathbf{N}, n_{i,j} \in \mathbf{N} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$
  - Approximation von Sensorrauschen
- Blockfehlerbehafteter Kanal
  - Überlagerung der Barcodes mit schwarzen Kreisscheiben  
→  $\sim 50\%$  aller Module/Bits der überlagerten Fläche werden invertiert
  - Modellierung von Fremdkörpern, Verschmutzung, etc.

AWGN-  
Kanal:



Kanal mit  
Blockfeh-  
lern:





# 2D-Barcodes

## Detektion & Decodierung

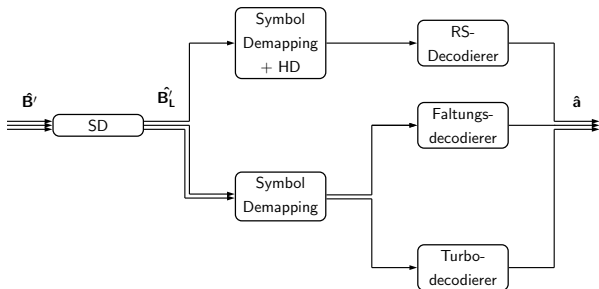
- Barcode Detektor

- Bildverarbeitung, Kantendetektion

- Gewinnung der Werte  $\hat{b}'_{z,s}$  der Barcodedatenmatrix  $\hat{\mathbf{B}}'$  aus dem gestörten Barcode  $\hat{\mathbf{B}}$

→ Matched-Filter: 
$$\hat{b}'_{z,s} = \frac{\sum_{l_z=1}^L \sum_{l_s=1}^L b_{z,s}^{l_z,l_s}}{L^2}$$

- Barcode Decodierer:





## Auswertung

- Soft-Input-Decodierung von Faltungscodier- und Turbo-codier-basierte Barcodes
- AWGN-Kanal
  - WER (Wortfehlerrate) in Abh. von  $E_b/N_0$
  - jeweils 20 Decodierungen pro  $E_b/N_0$ -Wert
- Blockfehlerbehafteter Kanal
  - Erfolgreiche Decodierversuche in Abh. der Bitfehler(rate) vor der Decodierung
  - jeweils 800 Decodierversuche pro Barcodevariante

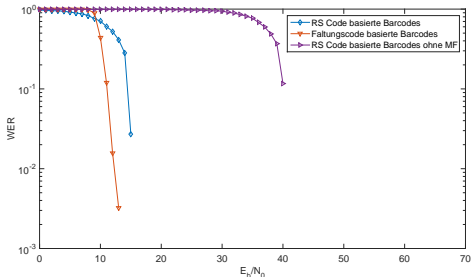
Variante	Größe	Datengröße
RS-Code-basierte Barcodes	44x44	1936 Bit
Faltungscodier-basierte Barcodes	43x43	1849 Bit
Turbo-codier-basierte Barcodes	43x43	1849 Bit



# Auswertung

## Matched-Filter-Detektion

$$R = 1/2:$$



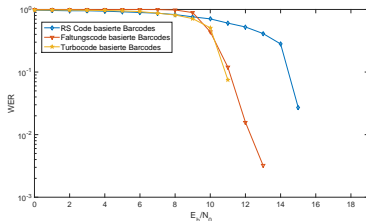
- ohne MF  $\hat{=}$  1 Abtastwert pro Modul (nach Standard)
- RS-Code mit MF vs. RS-Code ohne MF: -25 dB
- Faltungscodier mit MF und Soft-Input vs. RS-Code mit MF und Hard-Input: -2 dB
- ▶ 27 dB Signal-Störabstandsgewinn gegenüber Standardverfahren



# Auswertung

AWGN-Kanal

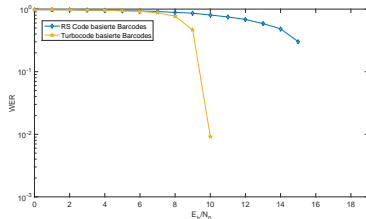
$R = 1/2$ :



Fehlerfreie Decodierung bei  $R = 1/2$ :

- RS-Code ab 16 dB
- Faltungscodes ab 14 dB
- Turbocode ab 12 dB

$R = 1/3$ :



Fehlerfreie Decodierung bei  $R = 1/3$ :

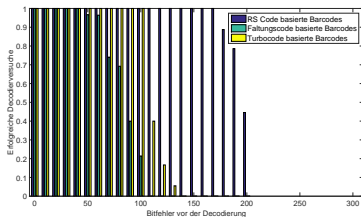
- RS-Code ab 16 dB
- Turbocode ab 11 dB



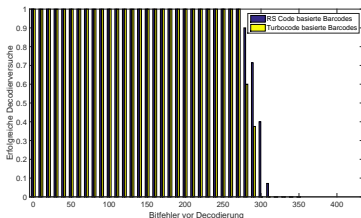
# Auswertung

## Blockfehlerbehafteter Kanal

$$R = 1/2:$$



$$R = 1/3:$$



Maximal zulässige Bitfehlerrate vor Decodierung bei  $R = 1/2$ :

- RS-Code 8,8%
- Faltungscodes 2,15%
- Turbo codes 5,4%

Maximal zulässige Bitfehlerrate vor Decodierung bei  $R = 1/3$ :

- RS-Code 13,9%
- Turbo codes 14,6%



## Zusammenfassung

- Blockfehlerbehafteter Kanal
  - RS-basierte Barcodes sind Faltungscode-basierten Barcodes überlegen
  - nur bei  $R = 1/3$  leicht bessere Performanz des Turbocodes gegenüber RS-Code
- AWGN-Kanal
  - Matched-Filter-Detektion bietet Signal-Störabstandsgewinn von 25 dB (RS-Code) bzw. 27 dB (Faltungscode) gegenüber Abtastung mit einem Abtastwert pro Modul bei  $R = 1/2$  (RS-Code)
  - zusätzlicher Gewinn durch Einsatz von Turbocodes möglich
- ▶ Bei Kanälen mit überwiegend AWGN-Charakter (z. B. Sensorrauschen, schlechte Belichtung, etc.) kann durch den Einsatz der vorgeschlagenen Matched-Filter-Detektion sowie von Turbocodes eine Verbesserung der Decodierperformanz erreicht werden





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!





## Symbolplatzierungsschema für einen Reed-Solomon-basierten Barcode der Größe 20:

2.1	2.2	3.6	3.7	3.8	4.3	4.4	4.5	13.1	13.2	14.6	14.7	14.8	15.3	15.4	15.5	1.1	1.2
2.3	2.4	2.5	5.1	5.2	4.6	4.7	4.8	13.3	13.4	13.5	16.1	16.2	15.6	15.7	15.8	1.3	1.4
2.6	2.7	2.8	5.3	5.4	5.5	12.1	12.2	13.6	13.7	13.8	16.3	16.4	16.5	29.1	29.2	1.6	1.7
1.5	6.2	6.2	5.6	5.7	5.8	12.3	12.4	12.5	17.1	17.2	16.6	16.7	16.8	29.3	29.4	29.5	7.1
1.6	6.3	6.4	6.5	11.1	11.2	12.6	12.7	12.8	17.3	17.4	17.5	28.1	28.2	29.6	29.7	29.8	7.3
7.2	6.6	6.7	6.8	11.3	11.4	11.5	18.1	18.2	17.6	17.7	17.8	28.3	28.4	28.5	30.1	30.2	7.6
7.4	7.5	10.1	10.2	11.6	11.7	11.8	18.3	18.4	18.5	27.1	27.2	28.6	28.7	28.8	30.3	30.4	30.5
7.7	7.6	10.3	10.4	10.5	19.1	19.2	18.6	18.7	18.8	27.3	27.4	27.5	31.1	31.2	30.6	30.7	30.8
9.1	9.2	10.6	10.7	10.8	19.3	19.4	19.5	26.1	26.2	27.6	27.7	27.8	31.3	31.4	31.5	8.1	8.2
9.3	9.4	9.5	20.1	20.2	19.6	19.7	19.8	26.3	26.4	26.5	32.1	32.2	31.6	31.7	31.8	8.3	8.4
9.6	9.7	3.5	20.3	20.4	20.5	25.1	25.2	26.6	26.7	26.8	32.3	32.4	32.5	38.1	38.2	8.6	8.7
8.5	21.1	21.2	20.6	20.7	20.8	25.3	25.4	25.5	33.1	33.2	32.6	32.7	32.8	38.3	38.4	38.5	22.1
8.6	21.3	21.4	21.5	24.1	24.2	25.6	25.7	25.8	33.3	33.4	33.5	37.1	37.2	38.6	38.7	38.8	22.3
22.2	21.6	21.7	21.8	24.3	24.4	24.5	34.1	34.2	33.6	33.7	33.8	37.3	37.4	37.5	39.1	39.2	22.6
22.4	22.5	23.1	23.2	24.6	24.7	24.8	34.3	34.4	34.5	36.1	36.2	37.6	37.7	37.8	39.3	39.4	39.5
22.7	22.8	23.3	23.4	23.5	35.1	35.2	34.6	34.7	34.8	36.3	36.4	36.5	40.1	40.2	39.6	39.7	39.8
3.1	3.2	23.6	23.7	23.8	35.3	35.4	35.5	14.1	14.2	36.6	36.7	36.8	40.3	40.4	40.5	WHT	WHT
3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	35.6	35.7	35.8	14.3	14.4	14.5	15.1	15.2	40.6	40.7	40.8	WHT	BLK



## Symbolplatzierungsschema für einen Faltungcode-basierten Barcode der Größe 15:

2	187	37	157	97	217	22	142	82	202	52	172	112	7	1
41	161	101	221	26	146	86	206	56	176	116	11	131	71	191
93	213	18	138	78	198	48	168	108	105	123	63	183	33	153
28	148	88	208	58	178	118	13	133	73	193	43	163	103	223
80	200	50	170	110	5	125	65	185	35	155	95	215	20	140
54	174	114	9	129	69	189	39	159	99	219	24	144	84	204
106	127	121	61	181	31	151	91	211	16	136	76	196	46	166
134	74	194	44	164	104	224	29	149	89	209	59	179	119	14
186	36	156	96	216	21	141	81	201	51	171	111	6	126	66
160	100	220	25	145	85	205	55	175	115	10	130	70	190	40
212	17	137	77	197	47	167	107	67	122	62	182	32	152	92
147	87	207	57	177	117	12	132	72	192	42	162	102	222	27
199	49	169	109	4	124	64	184	34	154	94	214	19	139	79
173	113	8	128	68	188	38	158	98	218	23	143	83	203	53
0	120	60	180	30	150	90	210	15	135	75	195	45	165	3



Faltungscodierer mit Coderate  $R = 1/2$

