

Problem der Taktwiederherstellung vermeiden

- Eine Möglichkeit: Eine **getrennte Leitung, die den Takt überträgt**

Eine Vernetzungstechnologie mit einer separaten Signalleitung nur für den Takt, ist das serielle Bussystem I²C (Inter-Integrated Circuit)

Dieses ist aber wie auch vergleichbare Bussysteme nur für lokale Anwendungen und nicht zur Überbrückung großer Distanzen geeignet

- In Computernetzen sind separate Signalleitungen nur für den Takt wegen des Verkabelungsaufwands **nicht praktikabel**
 - Stattdessen empfiehlt es sich, die **Anzahl der Signalpegelwechsel zu erhöhen**, um die Taktrückgewinnung aus dem Datenstrom zu ermöglichen

Die folgenden Folien präsentieren verschiedene Leitungscode, die alle. . .

- (mehr oder weniger erfolgreich) versuchen die Probleme Baseline Wander und Clock Recovery zu lösen
- die Einschränkungen der jeweiligen Übertragungsmedien berücksichtigen müssen
 - Lichtwellenleiter und drahtlose Übertragungen via Infrarot und Laser ermöglichen nur 2 physische Signalpegel
 - Kupferkabel und drahtlose Übertragungen via Radiowellen ermöglichen ≥ 2 physische Signalpegel

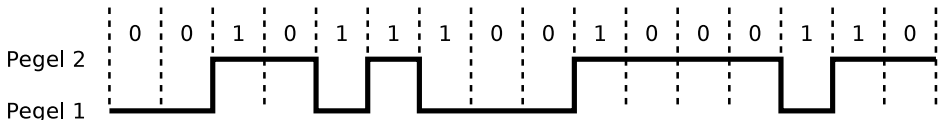
Auf keinen Fall bespreche ich alle Leitungscodes in der Vorlesung!



- Es macht keinen Sinn, alle Leitungscodes in der Vorlesung vorzustellen
 - Das wäre kein geeigneter Weg, damit Sie die wichtigsten Informationen über Leitungscodes lernen
 - Zudem ist es langweilig
- Die optimale Methode, sich mit den Leitungscodes auseinanderzusetzen ist die entsprechenden Übungsaufgaben von Übungsblatt 2 zu machen
 - Ich helfe Ihnen damit während der Übungsstunden

Non-Return to Zero Invert (NRZI)

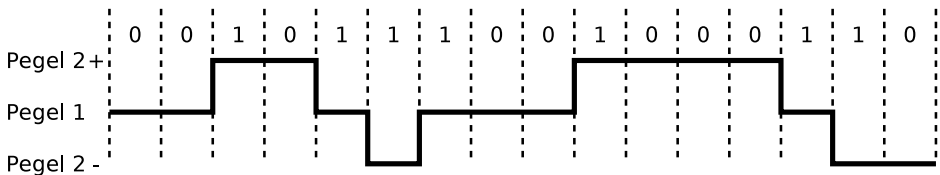
- Datenwert 1 senden \implies zu Beginn des Takts wechselt der Signalpegel
- Datenwert 0 senden \implies Signalpegel bleibt einen Takt lang unverändert
- **Keine Taktrückgewinnung** bei Reihen von Nullen
- Die Belegung der Signalpegel ist nicht gleichverteilt
 - Darum sind **Durchschnittsverschiebungen möglich**



Verwendet Ethernet 100BASE-FX (Multimode-Glasfaser) und FDDI

Multilevel Transmission Encoding - 3 Levels (MLT-3)

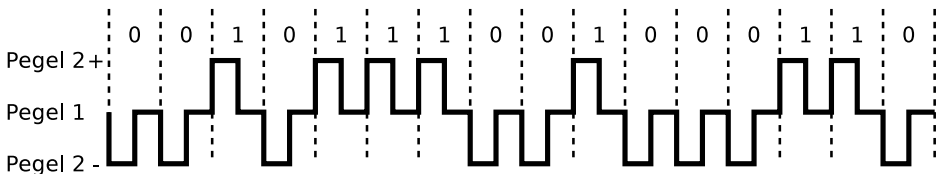
- Dieser Leitungscodierung verwendet die 3 Signalpegel +, 0 und -
 - Beim Senden des Datenwerts 0 findet kein Pegelwechsel statt
 - Datenwert 1 wird abwechselnd entsprechend der Folge [+ , 0 , - , 0] kodiert
- Genau wie bei NRZI besteht das **Problem der Taktrückgewinnung** bei Reihen von Nullen und **Durchschnittsverschiebungen sind möglich**



Verwendet Ethernet 100BASE-TX

Return-to-Zero (RZ)

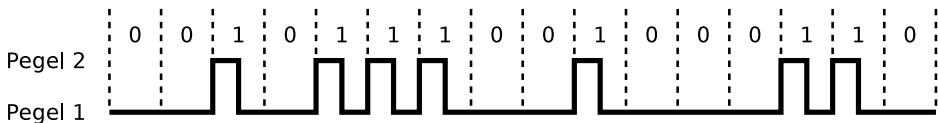
- Auch RZ verwendet 3 Signalpegel
 - Datenwert 1 senden \implies der positive Signalpegel wird für einen halben Takt übertragen und danach zum mittleren Signalpegel zurückgekehrt
 - Datenwert 0 senden \implies der negative Signalpegel wird für einen halben Takt übertragen und danach zum mittleren Signalpegel zurückgekehrt



- Vorteil: Änderung des Signalpegels bei jedem übertragenen Datenbit
 - Ermöglicht dem Empfänger die **Taktrückgewinnung** (Synchronisierung)
- Nachteile:
 - Benötigt im Vergleich zu NRZ **doppelt so viel Bandbreite**
 - Bei Reihen von Einsen oder Nullen sind **Durchschnittsverschiebungen möglich**

Unipolare RZ-Kodierung

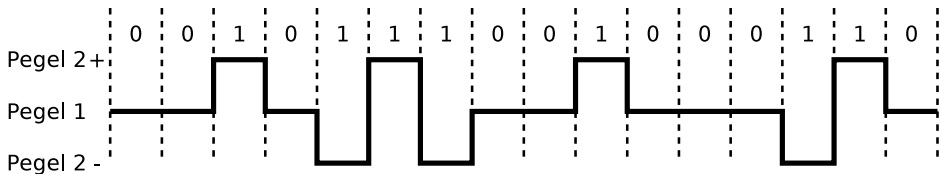
- Sonderform der RZ-Kodierung
 - Verwendet nur 2 Signalpegel
 - Datenwert 0 wird mit Signalpegel 1 kodiert
 - Datenwert 1 senden \implies der positive Signalpegel wird für einen halben Takt übertragen und danach zu Signalpegel 1 zurückgekehrt
- **Keine Taktrückgewinnung** bei Reihen von Nullen
- Die Belegung der Signalpegel ist nicht gleichverteilt
 - Somit sind **Durchschnittsverschiebungen möglich**



Dieser Leitungscodeword wird u.a. bei drahtlosen optischen Datenübertragungen via IrDA im Übertragungsmodus SIR verwendet

AMI-Kodierung (AMI = Alternate Mark Inversion)

- Arbeitet mit 3 Pegeln (+, 0 und -)
 - Datenwert 0 wird als mittlerer Signalpegel (0) übertragen
 - Datenwert 1 wird abwechselnd als positiver (+) oder negativer Signalpegel (-) übertragen
- Vorteil: **Durchschnittsverschiebungen sind ausgeschlossen**
- Nachteil: **Keine Taktrückgewinnung** bei Reihen von Nullen
- Fehlererkennung teilweise möglich, da ++, --, +0+ und -0- nicht erlaubt



AMI-Kodierung in der Praxis und Scrambler (Verwürfler)

Der ISDN S₀-Bus verwendet eine modifizierte Version der AMI-Kodierung

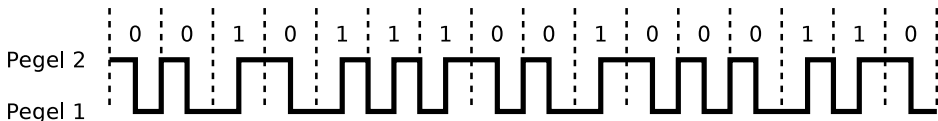
- Dabei wird der Datenwert 1 als mittlerer Signalpegel und der Datenwert 0 abwechselnd als positiver oder negativer Signalpegel übertragen
- Bei der AMI-Kodierung ist bei Serien aufeinanderfolgender Nullen die Taktrückgewinnung für den Empfänger unmöglich
 - Darum wird nach der AMI-Kodierung meistens ein **Scrambler** (Verwürfler) verwendet
 - Scrambler stellen ein Datensignal nach einem einfachen Algorithmus umkehrbar um
 - In diesem Fall kommen Scrambler zum Einsatz, die lange Ketten von Nullen unterbrechen um so die Taktrückgewinnung für den Empfänger zu ermöglichen

Bipolar With 8 Zeros Substitution (B8ZS)

- Wegen des Problems bei längeren Serien von Nullen verwendet man in der Praxis eine geringfügig modifizierte Versionen der AMI-Kodierung
⇒ **B8ZS**
- B8ZS verhindert einen Synchronisationsverlust bei längeren Serien von Nullen durch 2 **Regeln zur Modifikation** von Folgen von 8 Nullbits
 - +00000000 wird kodiert als: +000+-0-+
 - -00000000 wird kodiert als: -000-+0+-
- Eigentlich sind beide Ersetzungsregeln **Coderegelerletzungen**
 - Beide Ersetzungen enthalten jeweils 2 positive und negative Signalpegel nacheinander
 - Das macht die Ersetzungen für den Empfänger **erkennbar**
- Bei B8ZS sind im Gegensatz zu AMI **keine Scrambler nötig**
 - Grund: Längere Serien von Nullen sind bei B8ZS kein Problem
- **Durchschnittsverschiebungen sind** wie bei AMI **ausgeschlossen**

Manchesterkodierung (1/2)

- Arbeitet mit 2 Pegeln
 - Datenwert 1 wird als steigende Flanke kodiert
 - Wechsel von Signalpegel 1 zu Signalpegel 2
 - Datenwert 0 wird als fallende Flanke kodiert
 - Wechsel von Signalpegel 2 zu Signalpegel 1
- Folgen 2 identische Bits aufeinander, wird am Ende der Bitzelle auf das Anfangsniveau zurückgesprungen
 - Eine Bitzelle ist der für die Übertragung eines Bits reservierte Zeitraum



10 MBit/s Ethernet (z.B. 10BASE2 und 10BASE-T) verwendet diesen Leitungscode

Manchesterkodierung (2/2)

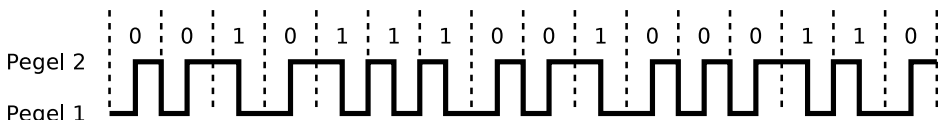
- Vorteile:
 - Es gibt stets Pegelwechsel zur Taktrückgewinnung
⇒ **Taktrückgewinnung ist** für den Empfänger **möglich**
 - Die Belegung der Signalpegel ist gleichverteilt
⇒ Der **Durchschnitt kann sich nicht verschieben**
- Nachteil: 1 Bit übertragen erfordert im Schnitt 1,5 Wechsel des Signalpegels

Da die Anzahl der Pegelwechsel ein limitierender Faktor des Übertragungsmediums ist, ziehen moderne Netzwerktechnologien andere Leitungscodes der Manchesterkodierung vor

- Bei diesem Leitungscodes entspricht die Bitrate der halben Baudrate
 - Also ist die Effizienz des Leitungscodes nur 50% im Vergleich zu NRZ
- **Bitrate:** Anzahl der Nutzdaten (in Bits) pro Zeit
 - **Baudrate:** Rate, in der sich Signale ändern pro Zeit

Manchester II-Kodierung

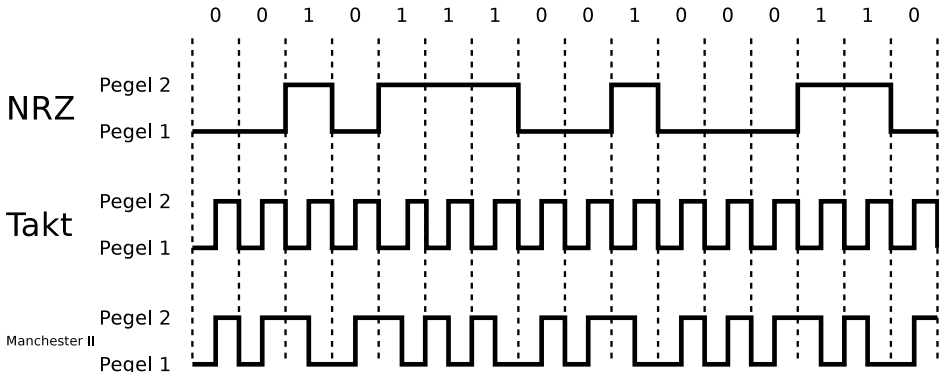
- Dieser Leitungscode ist das Gegenteil der Manchesterkodierung
 - Manchesterkodierung:
 - Sprung von 1 nach 0 entspricht einer 0
 - Sprung von 0 nach 1 entspricht einer 1
 - Manchester II-Kodierung:
 - Sprung von 0 nach 1 entspricht einer 0
 - Sprung von 1 nach 0 entspricht einer 1
- Wie bei Manchester ist die **Taktrückgewinnung** für den Empfänger **möglich** und die **Belegung der Signalpegel gleichverteilt**



Manchester II-Kodierung

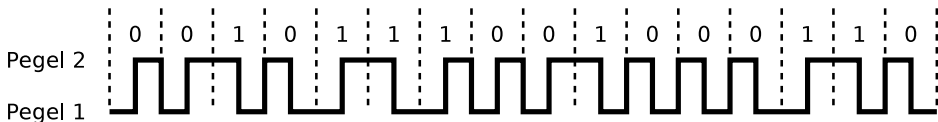
A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- Die Manchester II-Kodierung ist das exklusive Oder (XOR) der NRZ-kodierten Daten und des Takts



Differentielle Manchesterkodierung

- Heißt auch **Conditional DePhase Encoding (CDP)**
 - Datenwert 1 kodieren \implies nur in der Mitte der Bitzelle wechselt der Signalpegel
 - Datenwert 0 kodieren \implies am Anfang und in der Mitte der Bitzelle wechselt der Signalpegel
- Auch bei dieser Variante der Manchesterkodierung...
 - ist die **Taktrückgewinnung** für den Empfänger **möglich** und
 - der **Durchschnitt kann sich nicht verschieben**
- Abhängig vom Anfangspegel ergeben sich **2 mögliche, zueinander inverse Signalfolgen**



Diesen Leitungscode verwendet Token Ring (IEEE 802.5)

Zusammenfassung

- Alle bislang vorgestellten Kodierungen haben Nachteile
- ① **Verschiebung des Durchschnitts (Baseline Wander)**
 - Problem aufeinanderfolgender Nullen und Einsen bei NRZ
 - Problem aufeinanderfolgender Nullen bei NRZI, MLT-3, Unipolarem RZ und AMI
- ② **Taktwiederherstellung (Clock Recovery)**
 - Kann bei NRZ, NRZI, MLT-3, Unipolarem RZ und AMI nicht garantiert werden
- ③ **Mangelhafte Effizienz**
 - Bei den Varianten der Manchesterkodierung

Lösungsmöglichkeit: Blockcodes

- Moderne Netzwerktechnologien kodieren die Nutzdaten zuerst mit einer Kodierung, die...
 - **effizient ist**,
 - **Taktrückgewinnung garantiert** und
 - die **Durchschnittsverschiebungen vermeidet**
- Diese Kodierungen **verbessern** die Nutzdaten dahingehend, dass eine weitere Kodierung mit den Leitungscodes NRZ, NRZI oder MLT-3 ohne Probleme möglich ist
 - Danach ist eine Kodierung mit NRZ oder NRZI problemlos
- Beispiele für Kodierungen, die die Nutzdaten zuerst aufbereiten, sind 4B5B, 5B6B und 8B10B
 - Diese Kodierungen gehören zur Gruppe der **Blockcodes**, weil diese Eingabeblocke fester Größe in Ausgabeblocke fester Größe kodieren
- Das Ziel ist also, die positiven Eigenschaften der Manchesterkodierung und eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen

4B5B-Kodierung

- 4 Nutzdatenbits werden auf 5 Codebits abgebildet
 - Mit 5 Bits sind 32 Kodierungen möglich
 - Nur 16 Kodierungen werden für Daten verwendet (0–9 und A–F)
 - Die Übrigen 16 Kodierungen werden teilweise für Steuerzwecke verwendet
 - Wegen des zusätzlichen Bits zur Kodierung wird die kodierte Bitrate um den Faktor $5/4$ gegenüber der Nutzdatenbitrate gesteigert
 - Effizienz der 4B5B-Kodierung: 80%
 - Jede 5-Bit-Kodierung hat maximal eine führende Null und im Ausgabedatenstrom gibt es maximal drei Nullen in Folge
 - Die **Taktrückgewinnung** für den Empfänger ist somit **möglich**
 - Nach der Kodierung mit 4B5B erfolgt eine **weitere Kodierung** z.B. mittels NRZI oder MLT-3
 - Bei Kombination von 4B5B und NRZI (für 2 Signalpegel) oder MLT-3 (für 3 Signalpegel) kann **keine Durchschnittsverschiebung** auftreten
- Ethernet 100BASE-TX: Nach 4B5B erfolgt eine weitere Kodierung mit MLT-3
 - FDDI und Ethernet 100BASE-FX: Nach 4B5B erfolgt eine weitere Kodierung mit NRZI

4B5B-Kodierung (Tabelle)

Bezeichnung	4B	5B	Funktion
0	0000	11110	0 Hexadezimal (Nutzdaten)
1	0001	01001	1 Hexadezimal (Nutzdaten)
2	0010	10100	2 Hexadezimal (Nutzdaten)
3	0011	10101	3 Hexadezimal (Nutzdaten)
4	0100	01010	4 Hexadezimal (Nutzdaten)
5	0101	01011	5 Hexadezimal (Nutzdaten)
6	0110	01110	6 Hexadezimal (Nutzdaten)
7	0111	01111	7 Hexadezimal (Nutzdaten)
8	1000	10010	8 Hexadezimal (Nutzdaten)
9	1001	10011	9 Hexadezimal (Nutzdaten)
A	1010	10110	A Hexadezimal (Nutzdaten)
B	1011	10111	B Hexadezimal (Nutzdaten)
C	1100	11010	C Hexadezimal (Nutzdaten)
D	1101	11011	D Hexadezimal (Nutzdaten)
E	1110	11100	E Hexadezimal (Nutzdaten)
F	1111	11101	F Hexadezimal (Nutzdaten)
Q	—	00000	Quiet (Leitung ist tot) \Rightarrow Signalverlust
I	—	11111	Idle (Leitung ist untätig) \Rightarrow Pause
J	—	11000	Start (Teil 1)
K	—	10001	Start (Teil 2)
T	—	01101	Ende (Teil 1)
R	—	00111	Ende (Teil 2) \Rightarrow Reset
S	—	11001	Set
H	—	00100	Halt (Übertragungsfehler)

- Die in der Tabelle fehlenden 5-Bit-Kombinationen sind ungültig, da sie mehr als 1 führende oder 2 aufeinanderfolgende Nullen besitzen

Bei Fast Ethernet 100BASE-TX beginnen Rahmen mit einem JK und enden mit einem TR

5B6B-Kodierung (1/2)

- 5 Nutzdatenbits werden auf 6 Codebits abgebildet
 - Von den 32 möglichen 5-Bit-Wörtern werden 20 auf 6-Bit-Wörter mit einer identischen Anzahl Einsen und Nullen abgebildet
⇒ **neutrale Ungleichheit** (*balanced*)
 - Für die verbleibenden zwölf 5-Bit-Wörter existiert je eine Variante mit 2 Einsen und 4 Nullen und eine mit 4 Einsen und 2 Nullen
⇒ **positive oder negative Ungleichheit** (*unbalanced*)
- Sobald das erste 5-Bit-Wort ohne Abbildung mit neutraler Ungleichheit verarbeitet werden soll, wird auf die Variante mit der positiven Ungleichheit zurückgegriffen
 - Beim nächsten 5-Bit-Wort ohne neutrale Ungleichheit wird die Variante mit negativer Ungleichheit verwendet
 - Die Varianten mit positiver oder negativer Ungleichheit wechseln sich ab

5B6B-Kodierung (2/2)

- Nach der Kodierung mit 5B6B erfolgt eine weitere Kodierung mit NRZ
 - Das ist möglich, da bei 5B6B die **Taktrückgewinnung** für den Empfänger **möglich** ist und **keine Durchschnittsverschiebungen** auftreten können
- Vorteil gegenüber Manchesterkodierung: Höhere Baudrate
 - Effizienz: $5/6 = 83,3\%$

5B6B wird bei Fast-Ethernet 100Base-VG verwendet

8B10B-Kodierung

- Bei 8B10B werden 8 Nutzdatenbits auf 10 Codebits kodiert
 - Die Effizienz ist somit 80%
- Jede 8B10B-Kodierung ist so aufgebaut, das in den 10 Bits entweder...
 - 5x Null und 5x Eins vorkommt \implies neutrale Ungleichheit
 - 6x Null und 4x Eins vorkommt \implies positive Ungleichheit
 - 4x Null und 6x Eins vorkommt \implies negative Ungleichheit
- Nach der Kodierung mit 8B10B erfolgt eine weitere Kodierung via NRZ
 - **Durchschnittsverschiebungen sind nicht möglich**, weil einige der $2^8 = 256$ möglichen 8-Bit-Wörter auf 2 verschiedene Arten kodiert werden können
 - So werden Ungleichheiten ausgeglichen
- Jede 10-Bit-Kodierung enthält mindestens 3 Pegelsprünge und nach spätestens 5 Takten wechselt der Signalpegel
 - Das **ermöglicht** dem Empfänger **die Taktrückgewinnung**

Wird u.a. bei Gigabit-Ethernet 1000Base-CX, -SX, -LX, FibreChannel, InfiniBand, DisplayPort, FireWire 800 (IEEE 1394b) und USB 3.0 verwendet

8B6T-Kodierung (Tabelle)

8-Bitfolge	8B6T-Code	8-Bitfolge	8B6T-Code	8-Bitfolge	8B6T-Code
00	+--00+-	10	+0+--0	20	00---+
01	0+--+0	11	++0-0-	21	--+00+
02	+--0+-0	12	+0+-0-	22	++-0+-
03	-0++-0	13	0++-0-	23	++-0-+
04	-0+0+-	14	0+--0	24	00+0-+
05	0+--0+	15	++00--	25	00+0+-
06	+--0-0+	16	+0+0--	26	00-00+
07	-0+-0+	17	0++0--	27	---++-
08	-+00+-	18	0+-0+-	28	-0---+
09	0---0-	19	0+-0-+	29	--0+0+
0A	-+0+-0	1A	0+---+	2A	-0-+0+
0B	+0-+-0	1B	0+-00+	2B	0---+0+
0C	+0-0+-	1C	0-+00+	2C	0---+0
0D	0-+-0+	1D	0-+++-	2D	--00++
0E	-+0-0+	1E	0-+0-+	2E	-0-0++
0F	+0--0+	1F	0-+0+-	2F	0--0++

USW.

Zusammenfassung

Leitungscode	Signal-pegel	Durchschnitts-verschiebungen	Pegel-wechsel	Selbtsynchro-nisierend ¹	Effizienz ²	Direkt übertragbar	Weitere Kodierung
NRZ	2	ja	bei Wechseln	nein	100%	nein	—
NRZI	2	ja	bei 1	nein	75%	nein	—
MLT-3	3	ja	bei 1	nein	100%	nein	—
RZ	3	ja	immer	ja	50%	nein	—
Unip. RZ	2	ja	bei 1	nein	75%	nein	—
AMI	3	nein	bei 1	nein	100%	nein	Scrambler
B8ZS	3	nein	bei 1	ja	100%	ja	—
Manchester	2	nein	immer	ja	50%	ja	—
Manchester II	2	nein	immer	ja	50%	ja	—
Diff. Manch.	2	ja	immer	ja	50%	ja	—
4B5B	2	ja	—	ja	80%	nein	NRZI oder MLT-3
5B6B	2	nein	—	ja	83,3%	nein	NRZ
8B10B	2	nein	—	ja	80%	nein	NRZ
8B6T	3	nein	—	ja	100%	ja	—

¹ Gibt an, ob die Taktrückgewinnung mit diesem Leitungscode möglich ist.

² Verhältnis von Bitrate (Nutzdaten in Bits pro Zeit) und Baudrate (Signaländerungen pro Sekunde).