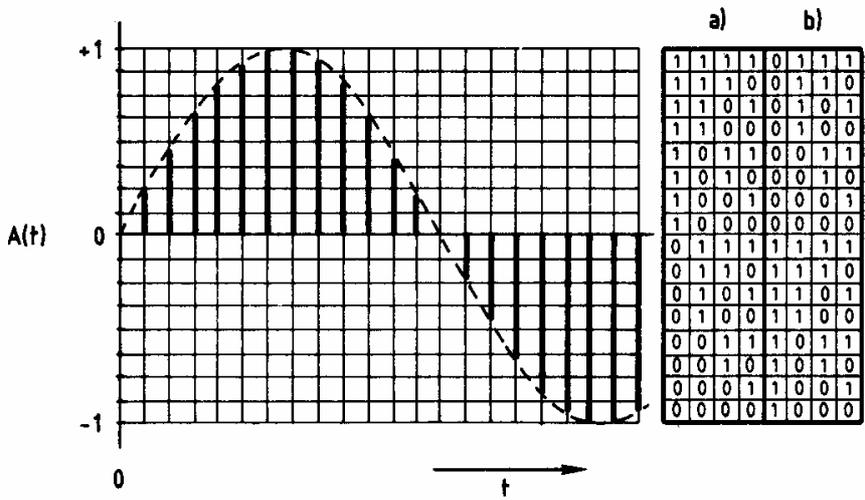


Digitaltechnik Grundlagen



Version 1.2

Inhalt

1. Mathematische Zahlensysteme	3
1.1 Addition und Subtraktion in den polyadischen Zahlensystemen	5
1.2 Darstellung negativer Zahlen	7
2. Timecode	9
3. Digitale Audioschnittstellen	11
3.1 AES/EBU	11
4. Wordclock.....	14
5. Studioverkabelung eines Digitalstudios.....	14
6. Begriffserklärungen	16
7. Informationen zum Skript	17

1. Mathematische Zahlensysteme

Die Mathematik benutzt verschiedene Arten, Zahlen darzustellen. Abhängig vom kulturellen Hintergrund wurde in der Geschichte mit verschiedenen Systemen gearbeitet; durchgesetzt hat sich für den täglichen Gebrauch aber das Zehnersystem.

Im Umgang mit Computern gibt es noch weitere wichtige Zahlensysteme, die daraus entstanden sind, dass logische Bausteine in der Digitaltechnik nur zwischen zwei Werten unterscheiden können, die in der Datenverarbeitung dann als 0 und 1 angesehen werden.

Eine der ältesten Arten, Zahlen darzustellen, ist wohl die Abzählschreibweise mit Strichen. Dabei wird eine Zahlenerhöhung durch Hinzufügen eines Striches erreicht. Diese Schreibweise ist etwas umständlich und kann nur für sehr kleine Zahlen angewandt werden. Es ist bedeutungslos, an welcher Stelle ein neuer Strich eingefügt wird, es gibt also keine Stellenwertigkeit. Eine leicht verbesserte Abwandlung ist die Bündelung in Fünfer-Blöcke, wobei jeweils vier Striche durch einen Schrägstrich zur Fünf ergänzt werden.

Die Römer haben die Abzählschreibweise etwas verfeinert. Hier wird innerhalb des Systems mit verschiedenen Zahlenwerten gerechnet. So bleibt der Strich für den Wert Eins bestehen und bis zur Drei wird abgezählt. Dann folgt der Wert Fünf als V, von dem eine Eins abgezogen wird. Diese Subtraktion wird durch das Voranstellen der Zahl angezeigt. Die Sechs wird dann durch einen hinter das V gestellten Strich dargestellt.

5 mal I	wird durch	V	dargestellt	(=5),
2 mal V	wird durch	X	dargestellt	(=10),
5 mal X	wird durch	L	dargestellt	(=50),
2 mal L	wird durch	C	dargestellt	(=100),
5 mal C	wird durch	D	dargestellt	(=500),
2 mal D	wird durch	M	dargestellt	(=1000).

Das römische Zahlensystem eignet sich schon zur Darstellung von Zahlen im Bereich bis etwa 5000, danach werden die Zahlen unübersichtlich. Aber auch diese Schreibweise ist zum Rechnen ungeeignet.

Eine Erleichterung bringt die Einführung von Stellenwertsystemen. Dabei erhält jede geschriebene Stelle verschiedene Symbole mit unterschiedlichen Zahlenwerten zugeordnet und jede Stelle besitzt einen vorgegebenen Wert. Außerdem ist in diesen Systemen die 0 bekannt.

Das wohl bekannteste Stellenwertsystem wird bei der Uhr und dem Datum angewandt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die Anzahl der möglichen Werte bei verschiedenen Stellen nicht identisch sind und die Wertigkeit der einzelnen Stellen keinem mathematischen Schema folgt.

Zum Rechnen werden idealerweise polyadische Zahlensysteme benutzt. Es sind Stellenwertsysteme, bei denen zusätzlich die einzelnen Stellenwerte nach einem exponentiellen Bildungsgesetz gestuft sind. Ein vorangestelltes Symbol erhält den Wert mit der nächst höheren Potenz des höchsten Zahlenwertes. Im Zehnersystem kann beispielsweise jede Stelle zehn verschiedene Werte annehmen (0, 1, 2, ... , 9). Die Stellen werden dann von rechts angefangen mit den Werten 10^1 , 10^2 , 10^3 , ... multipliziert, um den Stellenwert zu errechnen.

Für die Digitaltechnik werden in der Regel Zahlensysteme mit der Basis 2 (Dual-System) oder 16 (Hexadezimal-System) benutzt. Die Basis 2 ergibt sich aus der Interpretation der Spannungswerte 0V und 5V (oder 3V) als 0 und 1, das Hexadezimal-System soll dem Menschen die Benutzung etwas angenehmer gestalten und trotzdem eine leichte Umrechnung in das Dual-System ermöglichen.

Dezimal	Dual	Hexadezimal
Basis 10	Basis 2	Basis 16
0	0	0
1	1	1
2	10	2
3	11	3
4	100	4
5	101	5
6	110	6
7	111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
16	10000	10
17	10001	11
.	.	.
.	.	.

Abbildung 1:

**Polyadische
Zahlensysteme im
Vergleich**

Für Zahlensysteme mit einer Basis kleiner 10 werden die vorhandenen Ziffern genutzt, bei Systemen mit größerer Basis müssen diese durch Großbuchstaben ergänzt werden. Zur Umrechnung kann die Darstellung mit Potenzen der jeweiligen Basis genutzt werden.

(Die Dualzahl 10111 kann zum Beispiel als $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$ dargestellt werden, was dann einer 23 im Dezimalsystem entspricht.)

Ein großer Vorteil des Hexadezimal-Systems ist die einfache Umrechnung ins Dual-System und zurück. Dabei kann jede Stelle des Hexadezimal-Systems in vier Stellen des Dual-Systems umgewandelt werden. Die Umwandlung in das Dezimal-System kann dagegen nicht Stellenweise erfolgen.

1.1 Addition und Subtraktion in den polyadischen Zahlensystemen

Für die Addition und Subtraktion gelten prinzipiell die gleichen Regeln, wie sie aus dem Dezimal-System bekannt sein sollten.

Am einfachsten ist es, die Zahlen übereinander zu schreiben und dann von Rechts jede Stelle einzeln abzarbeiten. Dabei verwendet man das Arbeiten ohne Brüche aus der Grundschule.

Für das Dezimal-System gilt:

$$\begin{array}{r} 1234 \\ 2153 \\ +1006 \\ \hline \underline{0010} \text{ Übertrag} \\ 4393 \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:
 $4+3+6=13$; $13:10=$ „1 Rest 3“
 Das Divisionsergebnis bildet den Übertrag, der Rest das Ergebnis für die berechnete Stelle.

$$\begin{array}{r} 2153 \\ -1006 \\ \hline \underline{0010} \text{ ‚Ausleih-Stelle‘} \\ 1147 \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:
 $3-6$ ist so nicht möglich, deshalb wird aus der nächst höheren Stelle eine 10 ausgeliehen. $13-6=7$. Die geliehene 10 ist in der höheren Stelle natürlich eine 1.

Für das Hexadezimal-System gilt:

$$\begin{array}{r} 1B3C \\ C453 \\ +12F6 \\ \hline \underline{1110} \text{ Übertrag} \\ F285 \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:

$C+3+6=21$; $21:16=$ „1 Rest 5“

Das Divisionsergebnis bildet den Übertrag, der Rest das Ergebnis für die berechnete Stelle.

$$\begin{array}{r} F1E3 \\ -10D6 \\ \hline \underline{0010} \text{ ‚Ausleih-Stelle‘} \\ E10D \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:

3-6 ist so nicht möglich, deshalb wird aus der nächst höheren Stelle eine 16 ausgeliehen. $19-6=13$. 13 ist im Hexadezimal-System D. Die geliehene 16 ist in der höheren Stelle natürlich eine 1.

Für das Dual-System gilt:

$$\begin{array}{r} 1011 \\ 0100 \\ +0011 \\ \hline \underline{11110} \text{ Übertrag} \\ 10010 \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:

$1+0+1=2$; $2:2=$ „1 Rest 0“

Das Divisionsergebnis bildet den Übertrag, der Rest das Ergebnis für die berechnete Stelle.

$$\begin{array}{r} 1110 \\ -1001 \\ \hline \underline{0010} \text{ ‚Ausleih-Stelle‘} \\ 0101 \end{array}$$

1. Stelle von Rechts:

0-1 ist so nicht möglich, deshalb wird aus der nächst höheren Stelle eine 2 ausgeliehen. $2-1=1$. Die geliehene 2 ist in der höheren Stelle natürlich eine 1.

1.2 Darstellung negativer Zahlen

Binär	Positiv Dezimal	Vorzeichen und Betrag	Zweier- Komplement
0000	0	+0	+0
0001	1	+1	+1
0010	2	+2	+2
0011	3	+3	+3
0100	4	+4	+4
0101	5	+5	+5
0110	6	+6	+6
0111	7	+7	+7
1000	8	-0	-8
1001	9	-1	-7
1010	10	-2	-6
1011	11	-3	-5
1100	12	-4	-4
1101	13	-5	-3
1110	14	-6	-2
1111	15	-7	-1

Abbildung 2: Verschiedene Arten der Interpretation von Binär-Zahlen

In der Binärdarstellung existiert kein Vorzeichen. Daher wird die eine Hälfte des Zahlenvorrates für positive und die andere Hälfte für negative Zahlen reserviert. Für die Darstellung negativer Zahlen bietet sich die Zweierkomplement-Schreibweise an, da dies die einzige Möglichkeit ist, jede Zahl (auch die Null) eindeutig darzustellen. Im Zweierkomplement wird die höchste Bit-Stelle als negative Zahl (mit der entsprechenden Wertigkeit) genutzt und alle anderen behalten ihre positive Bedeutung. Daraus können dann alle Zahlen abgeleitet werden, wenn die Anzahl der Bitstellen bekannt ist. Es ist also notwendig immer alle Stellen anzugeben, auch wenn sie eigentlich nicht genutzt werden.

Die Komplement-Schreibweise bietet außerdem die Möglichkeit, die Subtraktion von Zahlen auf eine Addition zurückzuführen.

Im Zehnerkomplement mit 3 Stellen kann die Zahl -1 beispielsweise durch die Zahl 999 dargestellt werden. Dann kann auch eine Subtraktion durch die entsprechende Addition ersetzt werden:

$$100 - 1 = 100 + (-1)$$

Komplementschreibweise:

$$\begin{array}{r} 100 \\ + 999 \\ \hline (1)099 \end{array}$$

Da für diese Komplement-Darstellung drei Stellen angenommen wurden, muss die neu entstandene vierte Stelle noch gestrichen werden, so dass die Berechnung das Ergebnis 099 liefert.

Eine negative Zahl in Komplementdarstellung bildet man durch Subtraktion der positiven gleichwertigen Zahl von der um eins erhöhten höchsten darstellbaren Zahl. Für das Zweierkomplement mit vier Stellen ist das also die Zahl 10000.

Im Zweierkomplement gibt es eine vereinfachte Variante, das Vorzeichen zu ändern. Dazu werden alle Stellen invertiert und anschließend eine 1 addiert.

Beispielsweise ergibt eine Vorzeichenänderung der Zahl 1011:

$$\begin{array}{r} 0100 \\ + \underline{0001} \\ \hline 0101 \end{array}$$

2. Timecode

Timecode ist ein Digitalsignal, das zur Synchronisation von Videorekordern und Tonbandgeräten entwickelt wurde. Es ist ein Zeitsignal, das mit der Genauigkeit des entsprechenden Film-Mediums aufgelöst wird. Charakteristisch ist also die Anzahl der Bilder pro Sekunde.

In der modernen Musikproduktion werden Timecode-Signale als absoluter Bezug für dynamische Automationen und ähnliche zeitabhängige Vorgänge benutzt.

Es gibt unterschiedliche Arten von Timecodes, hier seien drei erwähnt:

LTC - Longitudal Time Code:	wird auf Längsspuren (z.B. analoges Tonband) aufgezeichnet.
VITC – Vertical Interval Time Code:	wird in die Schrägspuren (Bildspuren) von Videorekordern integriert.
MTC - MIDI Time Code:	wird über die MIDI-Schnittstelle übertragen und zur Synchronisation mit Sequenzern benutzt.

Die Familien der Timecodes gliedern sich in verschiedene Unterformate, die sich durch verschiedene Bildraten unterscheiden.

Film	24	Fr/s	→ Kinofilm
EBU	25	Fr/s	→ Europäische Fernsehnorm (PAL)
SMPTE	30	Fr/s	→ Amerikanische Schwarz-weiß-Fernsehnorm (NTSC)
Drop Frame	29,97	Fr/s	→ Amerikanische Farb-Fernsehnorm (NTSC color)

(Erklärung der Abkürzungen:

EBU: European Broadcast Union; SMPTE: Society of Motion Picture and Television Engineers; PAL: Phase Alternation Line; NTSC: National Television Standards Committee; Fr/s: Frames per Second / Bilder pro Sekunde)

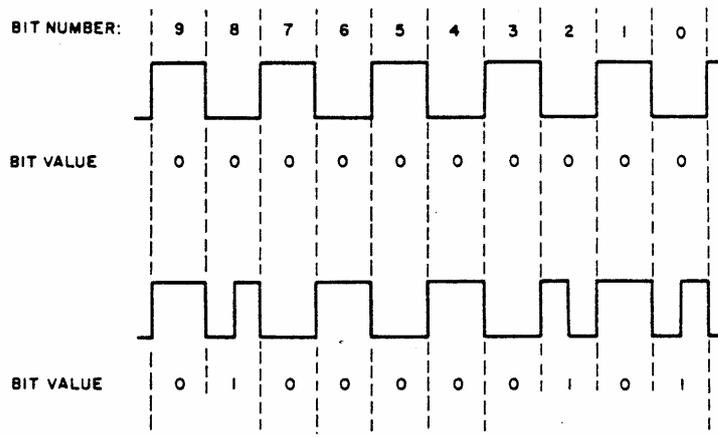


Figure 4-4. Time Code Bit Values

Abbildung 3: LTC Bit-Wertigkeiten

Der LTC-Timecode ist als Wechsel zwischen High- und Low-Pegel am Beginn eines Bits und bei ‚Einsen‘ zusätzlich einem Wechsel innerhalb des Bits definiert.

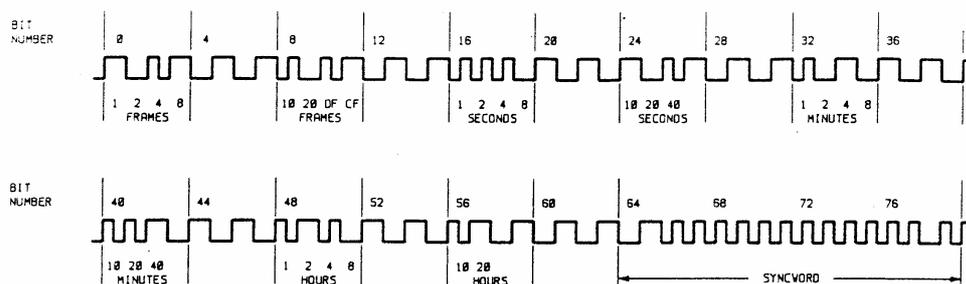


Abbildung 4: LTC-Code

Der LTC-Timecode besteht aus Zeitinformationen, die in Stunden, Minuten, Sekunden und Frames unterteilt sind, zusätzlichen Benutzer-Informationen, die Gerätehersteller für eigene Anwendungen nutzen können und einem Sync-Wort, das Anfang und Ende eines Wortes markiert und die Laufrichtung des Bandes erkennen läßt.

3. Digitale Audioschnittstellen

Digitale Audioschnittstellen sind in der Regel serielle Datenschnittstellen, die sich von den aus Computern bekannten Versionen dadurch unterscheiden, dass sie eine getaktete Übertragung durchführen. Der Übertragungstakt entspricht dabei der Abtastfrequenz des Gerätes. So ist es möglich, die Wandler eines Digitalmischpultes auf einkommende Digitalsignale zu synchronisieren und diese zeitrichtig zusammenzumischen.

Beispiele für digitale Audioschnittstellen sind AES/EBU, S/P-DIF, ADAT, TDIF, MADI und andere. Die Schnittstellen sind untereinander nur begrenzt kompatibel, für die Stereo-Schnittstellen AES/EBU und S/P-DIF ist eine Umsetzung jedoch recht einfach zu realisieren. Die anderen Schnittstellen sind auf verschiedene Anwendungen zugeschnitten und werden mit entsprechenden Interfaces betrieben.

(AES – Audio Engineering Society; EBU – European Broadcast Union; S/P-DIF – Sony Philips Digital Interface; ADAT – Alesis Digital Audio Tape; TDIF – Tascam Digital Interface; MADI – Multichannel Audio Digital Interface; mLAN – music Local Area Network)

3.1 AES/EBU

Die AES/EBU Schnittstelle ist eine Summenschnittstelle (mit Surround-Option). Auf dem Markt sind in der Regel zweikanalige Varianten erhältlich. Für mehrkanalige Anwendungen werden mehrere zweikanalige Schnittstellen benutzt.

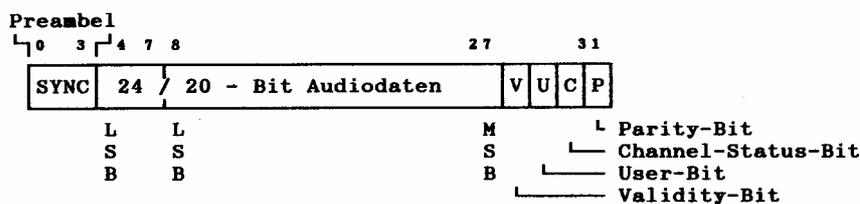


Abbildung 5:
AES/EBU Daten-Subframe

Die Daten jedes Samples eines Kanales werden mit einigen Zusatz-Bits zu einem Subframe zusammengefaßt [Abbildung 5]. Die Subframes der verschiedenen Kanäle werden nacheinander innerhalb eines Abtastzeitraumes übertragen. Die Übertragung eines Subframe dauert bei zweikanaliger Übertragung und 44100 Hz Abtastfrequenz also

$$\frac{1}{2 \cdot 44100 \text{ Hz}} \approx 11,3 \mu\text{s} .$$

Zu den Zusatz-Bits gehören Channel-Status-Bit und User-Bit. Diese werden über 192 Subframes zu einem Block zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet.

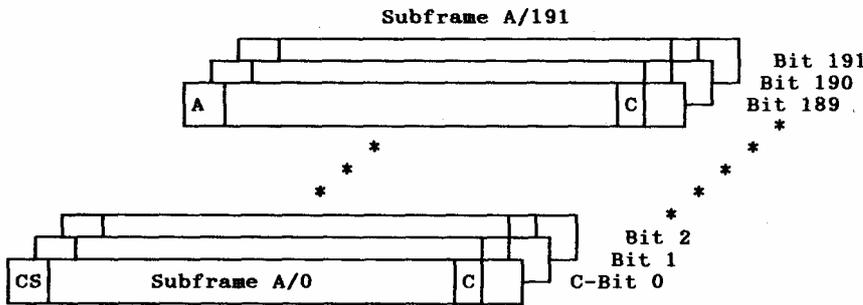


Abbildung 6:
AES/EBU
CS-Kanal

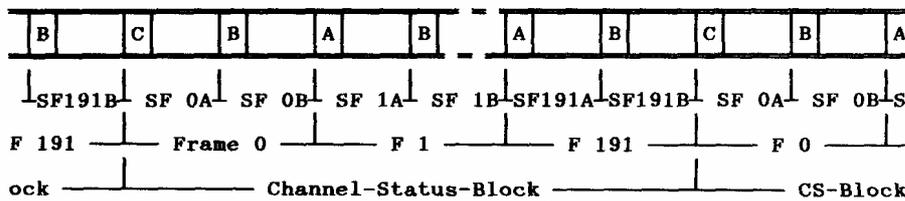


Abbildung 7:
AES/EBU
CS-Block

Programminformationen	Zusatzinformationen über das Verbreitungsmedium
Produktionszeit/-datum	Radio-Daten-Informationen (RDS)
Programmbezeichnung/Identifikations-Nr.	Sendernetz-Informationen
Programmdauer	Signal-Quellen-Informationen
Take-Bezeichnung/-Nr.	Timecode-bezogene Informationen
Schnitt-Information	
Satz-/Szenenbezeichnung	
Nummer der Kopie	
Urheberrechtsvermerke	

Abbildung 8:
AES/EBU
User-Daten

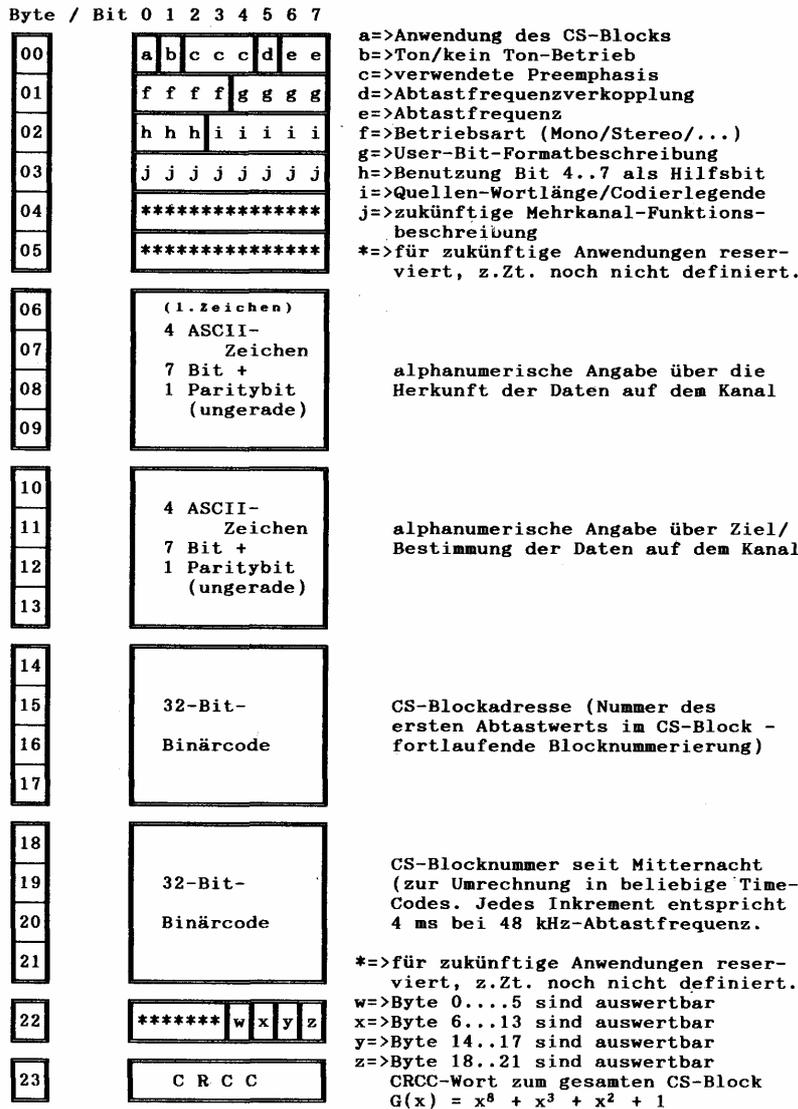


Abbildung 9: AES/EBU Channel-Status Daten

4. Wordclock

Wenn man zwei digitale Audiogeräte miteinander verbinden möchte, muss man für eine Synchronisation zwischen den Geräten sorgen. Wenn dies nicht geschieht, wird es Fehler in der Übertragung geben und es entstehen sogenannte ‚Glitches‘. Diese entstehen aus einer Sample-Taktverschiebung zwischen sendendem und empfangendem Gerät und einer daraus resultierenden Fehlinterpretation der Abtastwerte. Je nach Qualität der Empfangseinheit äußern sich diese Fehler in einzelnen hochfrequenten Knacksern oder sogar durchgehendem Knistern. Moderne digitale Audioschnittstellen sind selbsttaktend. Bei der Verbindung von zwei Geräten kann eine Synchronisation also über diese Schnittstellen erfolgen.

In einem digitalen Studio werden jedoch mehrere Quellen zusammengeführt, die im normalen Betrieb selbst ihre Abtastzeitpunkte bestimmen. Für solche Anwendungen muß zur Synchronisation ein Zusätzliches Signal benutzt werden. Dieses wird in der Audio-Technik als Wordclock bezeichnet. Es ist also ein Signal zur Taktung der Datenwörter.

Das Wordclock-Signal ist ein Rechtecksignal mit einer Frequenz, die der Abtastfrequenz der Übertragungs-Geräte entspricht. Sollte ein Gerät mit einer anderen Frequenz zum Einsatz kommen muß für die Übertragung ein Sample-Rate-Converter eingesetzt werden.

5. Studioverkabelung eines Digitalstudios

Solange Digitalgeräte nur hintereinandergeschaltet werden, ist eine REIHEN-SYNCHRONISATION ausreichend. Dabei dient das erste Gerät der Übertragungskette als Taktgeber (Master) und alle anderen müssen sich auf den einkommenden Takt synchronisieren (Slaves).

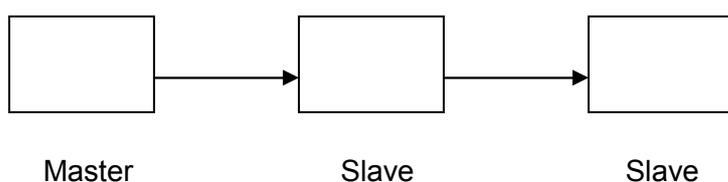


Abbildung 10:
Reihensynchronisation

Bei kompletten Digitalstudios reicht diese Form der Synchronisation nicht mehr aus. In einer komplexen Studioumgebung kommt es zum Aufeinandertreffen von digitalen Signalen

verschiedener Quellen, die so nicht synchronisiert werden können. Hier kommt eine STERNSYNCHRONISATION zum Einsatz. Geräte ohne Wordclock-Eingang müssen, wie Geräte mit abweichender Abtastfrequenz, durch einen Sample Rate Converter synchronisiert werden.

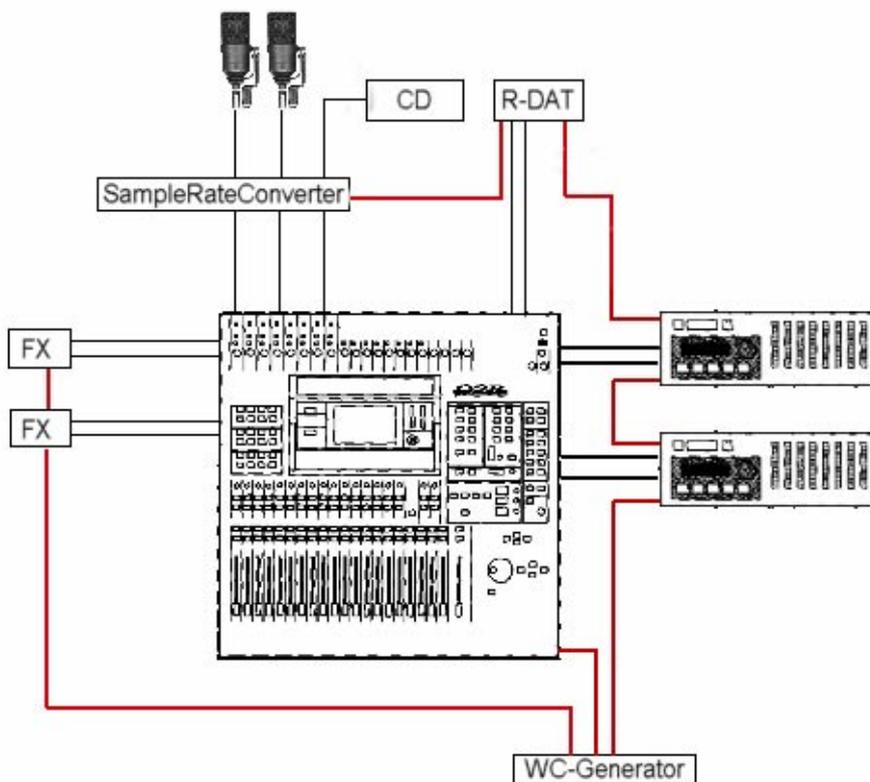


Abbildung 11: Stern-Synchronisation

6. Begriffserklärungen

bit	Eine Stelle im Zweiersystem für Digitalanwendungen; kleinster Speicherplatz
Kbit	1024 bit, hauptsächlich für Schnittstellen als Geschwindigkeitsangabe (Kbit/s)
Mbit	1024 Kbit
Byte	8 Bits werden als Byte bezeichnet
KByte (KB)	KiloByte (1024 Byte)
MByte (MB)	MegaByte (1024 KByte)
GByte (GB)	GigaByte (1024 MByte)
TByte (TB)	TeraByte (1024 GByte)
Wort	Ein zusammenhängender Datenblock (in der Audiotechnik zum Beispiel ein Sample)
Sample	(engl.: Probe) Ein Abtastwert eines Digitalsystems
MIDI	Musical Instrument Digital Interface; Digitalschnittstelle, die zum Datenaustausch zwischen Musikinstrumenten (z.B. Notenwerten) dient
serielle Schnittstelle	(z.B. RS 232, USB, ...) Computerschnittstellen, die Daten als Serie von Bits auf einer Kabel-Ader übertragen. Dagegen übertragen parallele Schnittstellen die Bits eines Wortes zeitgleich auf verschiedenen Kabel-Adern
Frame	(engl.: Rahmen) Ordnungseinheit für digitale Strukturen oder Begriff für die Bilder eines Films
Subframe	Dem Frame untergeordnete Einheit

7. Informationen zum Skript

Die aktuelle Version dieses Skriptes steht jederzeit unter <http://www.christoph-neuss.de/> zum Download bereit. Dort befinden sich auch Übungsaufgaben zum Umgang mit Zahlensystemen. Außerdem steht auch ein weiterführendes Skript zur Verfügung.

Für Hinweise zu Fehlern in diesem Skript bin ich sehr dankbar. Am einfachsten ist es, eine kurze E-Mail an mail@christoph-neuss.de zu schicken.