

Digitale Telemetriesystem - Funktionsbeschreibung

1. Digitale Telemetriesysteme

1.1 Telemetriesysteme mit PCM-Technik

Sollen mehrere Kanäle per Funk übertragen werden, müssen mehrere unterschiedliche HF-Trägerfrequenzen und eben so viele selektive HF-Empfänger verwendet werden, welche das Kosten/Nutzen-Verhältnis unverhältnismäßig vergrößern würden. Die Lösung des Problems bietet die digitale Übertragungstechnik. Die eigentliche Aufgabe von Mehrkanal-Telemetriesystemen besteht darin, die einzelnen Kanäle zeitlich so miteinander zu verschachteln und zu bündeln, dass sie am Ausgang auf einer „2-Draht-Leitung“ zur Verfügung stehen und über einem einzigen HF-Sender abgestrahlt oder über LWL bzw. Datenleitung übertragen werden können. Diese Art der Übertragungstechnik wird durch Digitalisieren, Multiplexen und PCM-Encodieren sämtlicher Kanäle realisiert. Die digitale PCM-Übertragungstechnik (Puls-Code-Modulation) wird seit vielen Jahren in der Kommunikations- und Nachrichtentechnik eingesetzt, z.B. weltweit zur Übermittlung von Fernsprechanalogen. Auch im Konsumerbereich macht die PCM von sich Reden, wo sie z.B. zur Übertragung von Audiosignalen über die Fire-Wire-Schnittstelle zwischen digitaler Video-Kamera und PC eingesetzt wird.

Die Vorteile der PCM-Übertragungstechnik sprechen für sich:

- gleich bleibender Signal/Rausch-Abstand durch Digitalisierung des Signals
- Mehrfachausnutzung eines Nachrichtenkanals durch Multiplexing
- sehr störteste Signalübertragung, geringe Empfindlichkeit gegen Übersprechen
- direkte Übernahme und Verarbeitung des empfangenen digitalen PCM-Signals in einem PC

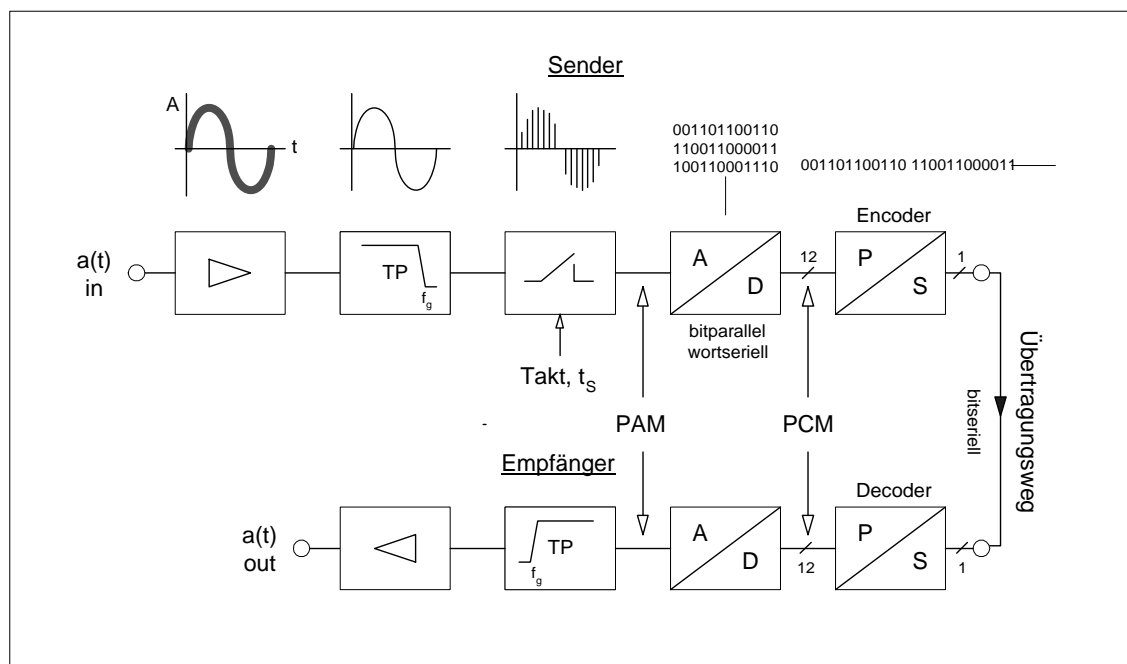


Bild 1: Blockschalbild einer 1-Kanal-PCM-Übertragungsstecke

2. Erzeugung eines PCM-Signals

Die Pulsmodulation (PCM) spielt bei der Erfassung, Übertragung und Auswertung von Messwerten eine immer größer werdende Rolle. Nachfolgend soll die Erzeugung eines digitalen PCM-Signals und der Prozess der Abtastung, Quantisierung, und Codierung näher beschrieben werden. Das Meßsignal $a(t)$ wird zunächst pegelangepasst (konditioniert) und in seiner Bandbreite gefiltert (Bild 1). Dem folgt als wesentliche Schritt, die Diskretisierung des kontinuierlichen Messsignals. Ein elektronischer Schalter (Sample & Hold), gesteuert von einem Taktgenerator, entnimmt dem Messsignal einzelne Signalproben, wobei die Pulsamplitude jedes mal dem Augenblickswert der analogen Eingangsspannung entspricht. Auf diese Weise erhält man am Ausgang des elektronischen Schalters ein pulsamplitudenmoduliertes Signal, das PAM-Signal. Das Abtasttheorem gibt an, mit welcher Mindestfrequenz ein analoges Signal abzutasten ist, damit ohne Informationsverlust aus den Abtastwerten wieder das ursprüngliche Signal gewonnen werden kann. Die Abtastfrequenz (f_s) muss größer sein als das Doppelte der höchsten im analogen Signal enthaltenen Frequenz (f_g):

$$f_s > 2 \times f_g$$

In der Praxis werden 4 bis 5 Abtastwerte (Samples) je Hz Bandbreite entnommen. Die Wirkung von Pulsamplitudenmodulation wird bei einer Betrachtung der Signale im Zeit- und Frequenzbereich deutlicher (Bild 2).

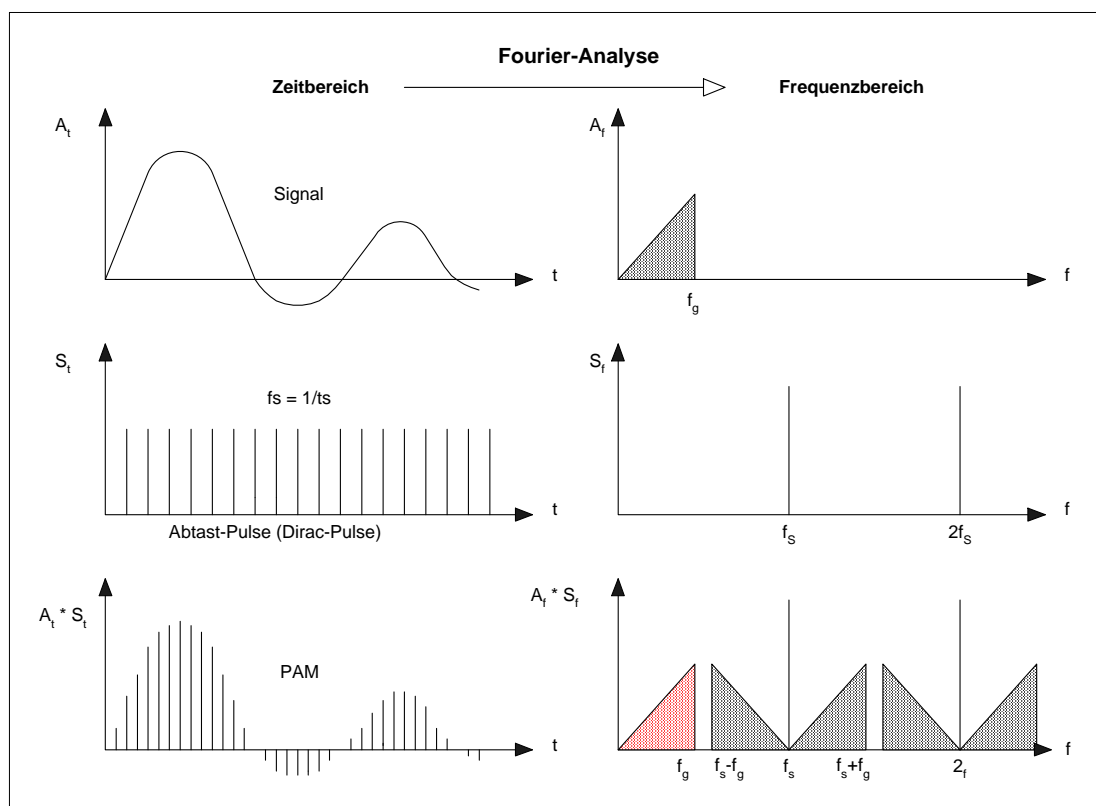


Bild 2: Abtastvorgang im Zeit- und Frequenzbereich

Beim Abtasten entsteht eine Pulsfolge, die nach der Fourieranalyse durch einen Gleichanteil und eine Summe von sinusförmigen Spannungen, die ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz sind, dargestellt werden kann. Im Frequenzbereich erzeugen die Abtastpulse systematisch Spektrallinien im Abstand von f_s . Rechts und links dieser Träger entstehen Modulationsseitenbänder - ähnlich der Amplitudenmodulation - mit oberen und unteren Seitenbändern bei $f_s - f_g$, $f_s + f_g$, $2f_s + f_g$, $2f_s - f_g$, u.s.w.. Die Information steckt in jedem Seitenband, zur weiteren Übertragung wird jedoch lediglich das in Bild 2 rot markierte Basisband verwendet. Aus dem Frequenzbereich wird auch ersichtlich, dass bei einer Vergrößerung der Signal-Grenzfrequenz die Modulationsseitenbänder sich ausweiten und ineinander fallen würden. In diesem Moment entsteht das sog. „Aliasing“, welches nur durch eine höhere Abtastrate verhindert werden könnte. In der Praxis tritt dieses Problem nicht auf, da das Signal schon im Eingang durch einen Tiefpass (Anti-Aliasing-Filter) bandbegrenzt ist.

Das pulsamplitudenmodulierte Signal in Bild 1 ist immer noch eine analoge Form des Eingangssignals. Die Abtastwerte lassen sich aber viel besser in digitaler Form übertragen und weiterverarbeiten. Zur abschließenden Quantisierung und Codierung, wird das PAM-Signal einem 12-bit-A/D-Wandler zugeführt. Der A/D-Wandler konvertiert (quantisiert) die einzelnen PAM-Impuls entsprechend ihrer momentanen Amplitude in 12-bit-Worte, einer digitalen Auflösung von 1024 Schritten. Ein PAM-Impuls der Amplitude 1 Volt wird demnach mit einer Auflösung $< 1\text{mV}$ digitalisiert. Das digitalisierte PAM-Signal nennt man PCM-Signal. Auf den 12-Bit-A/D-Wandler folgt ein Parallel/Serien-Wandler, der die 12-bit-Worte in einen bitseriellen Datenstrom umsetzt und sich das Signal auf einer Datenleitung, LWL oder über eine HF-Strecke übertragen lässt. Damit der Empfänger auf den serielle Datenstrom synchronisieren kann, werden vor jedem Datenwörtern noch sog. Synchronbits mit übertragen.

Auf der Empfangsseite geschieht das Gleiche, nur rückwärts. Nach erfolgter Serien/Parallel-Wandlung werden die 12-bit-Worte mit Hilfe von D/A-Wandlern in PAM-Signale umgesetzt und durch ein Tiefpassfilter von zeitdiskreten zu amplitudenkontinuierlichen Signalen geglättet. Jeder einzelne Signalwert ist gleich dem Mittelwert des entsprechenden Quantisierungsintervalls. Nach Verstärkung zur Pegelanpassung steht das ursprüngliche Messsignal $a(t)$ wieder zur Verfügung.

2.1 Multiplexen und Demultiplexen

Multiplexen ermöglicht die mehrkanalige, synchrone Übertragung von PCM-Kanälen. Wie aus Bild 1 und 2 zu erkennen, nehmen die Abtastpulse jeweils nur eine sehr begrenzte Zeitdauer in Anspruch und zwischen ihnen liegen verhältnismäßig große freie Zeitlücken. Nach dem Zeitmultiplexverfahren kann man die 12-bit-Codewörter von mehreren zu übertragenden Signalen zeitlich so staffeln, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen, sondern nur die sonst freien Lücken ausfüllen. So entsteht ein PCM-Multiplexsignal. Das Grundprinzip der zeitlichen Verschachtelung mehrerer Nachrichten (Codewörter) in einer Weise, dass sie über eine gemeinsame Leitung übertragen werden können, veranschaulicht Bild 3.

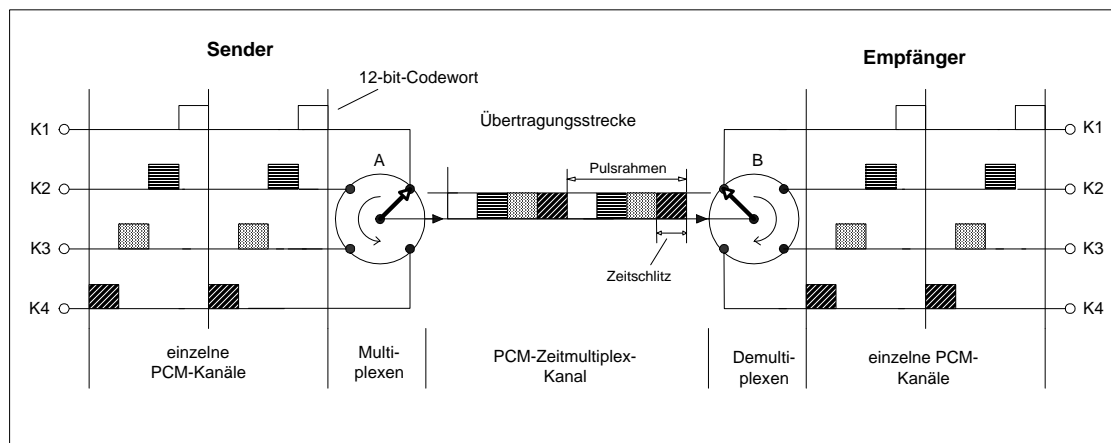


Bild 3: Prinzipdarstellung der Zeitmultiplexbildung und der Demultiplexbildung

Die Vorgänge beim Multiplexen werden vollelektronisch abgewickelt. Zur Erläuterung des Prinzips zeigt Bild 3 vier Eingangssignale, die von einem umlaufenden Schalter A zyklisch abgetastet werden. Synchron mit der Folge der ankommenden Codewörter wird der Schalter A auf den nächsten Eingang gesteuert. Am Ausgang des Schalters A steht dann das PCM-Zeitmultiplexsignal zur Verfügung. Der Zeitabschnitt, in dem ein Codewort übertragen wird, heißt Zeitschlitz (Time-Slot). Eine Bitfolge, die von jedem Eingangssignal ein Codewort enthält, bezeichnet man als Pulsrahmen. Für das aufgeführte Beispiel in Bild 3 besteht ein Pulsrahmen aus vier aneinandergereihten Codewörtern der Eingangssignale K1...K4. Die erforderliche Abtastfrequenz des Multiplexer zur vollständigen Übertragung der digitalen Informationen beträgt

$$f_s > 2 \times f_g \times \text{Kanalanzahl}$$

Auf der Empfangsseite werden aus dem Zeitmultiplexsignal die einzelnen PCM-Signale zurück gewonnen, d.h. die 12-bit-Codewörter werden auf die entsprechenden Ausgänge verteilt. Der umlaufende Schalter B verteilt im Synchronlauf die Codewörter auf die vier Ausgänge. Wie bei der Zeitmultiplexbildung auf der Senderseite, laufen die Vorgänge beim Demultiplexen vollelektronisch ab.

3. Mehrkanal-Telemetriesysteme

Bilder 4 und 5 zeigen den prinzipiellen Aufbau eines Mehrkanal-Telemetriesystems, als Beispiel mit 4 Übertragungskanälen. Das PCM-Übertragungssysteme besteht im wesentlichen aus zwei Einheiten, einem PCM-Encoder zur Erfassung und Codierung der Messwerte auf der Sendeseite und einem PCM-Decoder zur Decodierung und Ausgabe der Messwerte auf der Empfangsseite.

Im Encoder werden folgende Funktionen durchgeführt:

- Signalaufbereitung des analogen Eingangssignals (Sensorsignal)
- Bandbreitenbegrenzung durch TP-Filter
- Simultane Signalabtastung durch einen Sample & Hold Verstärker

- A/D-Wandlung (ADC) des abgetasteten Signals
- Parallel-Serien-Wandlung der 12-bit Wörter
- Einblendung von Synchronzeichen
- Konvertierung in einen PCM-Code
- FSK-Modulation eines HF-Sender

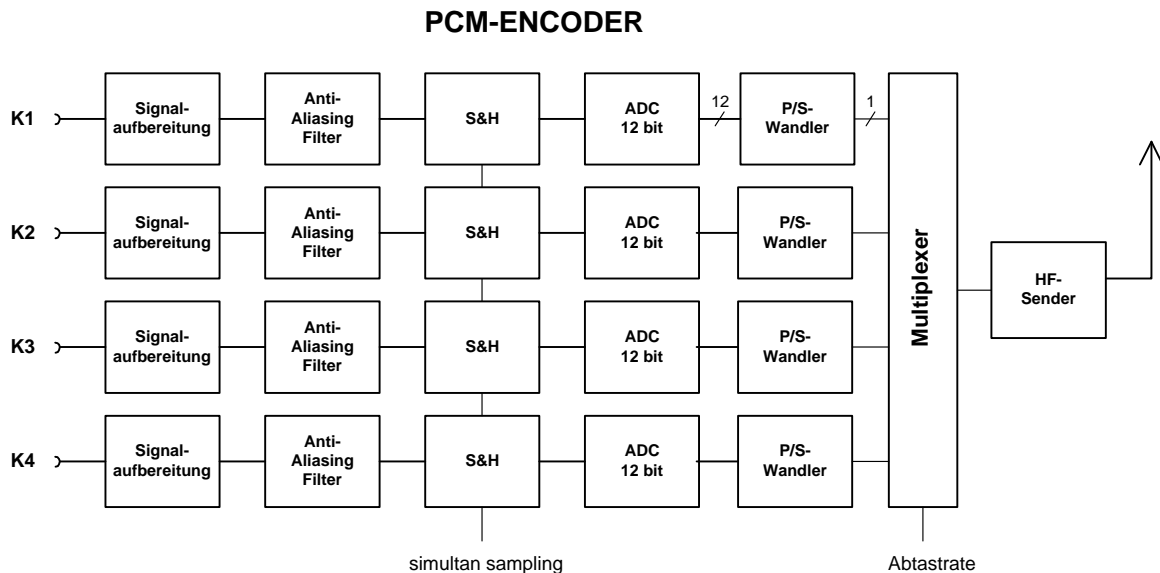


Bild 4: Blockschaltbild eines PCM-Mehrkanal-Encoders

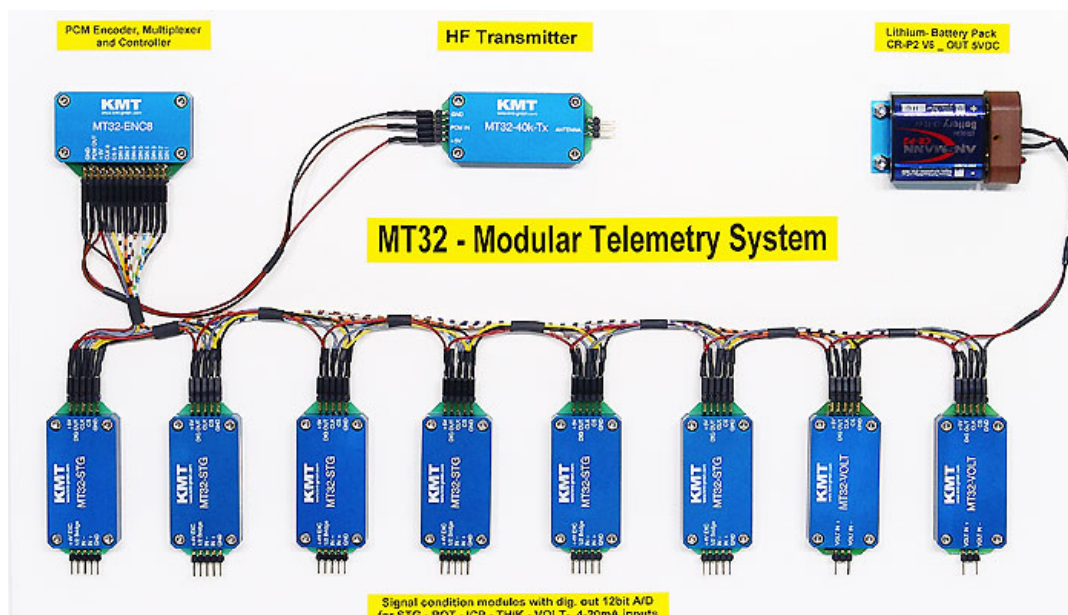


Bild 4.1: Beispiel einer modular aufgebauten 8-Kanal Telemetrie, mit A/D-Wandlern, Encoder und HF-Sender

Der Decoder auf der Empfangsseite erfüllt folgende Aufgaben:

- selektive Verstärkung und Demodulation des HF-Signals
- Regenerierung des eintreffenden seriellen PCM-Signals
- Erzeugung eines zum Eingangssignal synchronen Taktes
- Erkennung der Synchronzeichen und Generierung der zugehörigen Messwertadressen
- Ausgabe von Daten in bit-paralleler, wort-serieller Form an eine PC-Interfacekarte (IF16)
- D/A-Wandlung der Daten und Ausgabe als analoges Signal

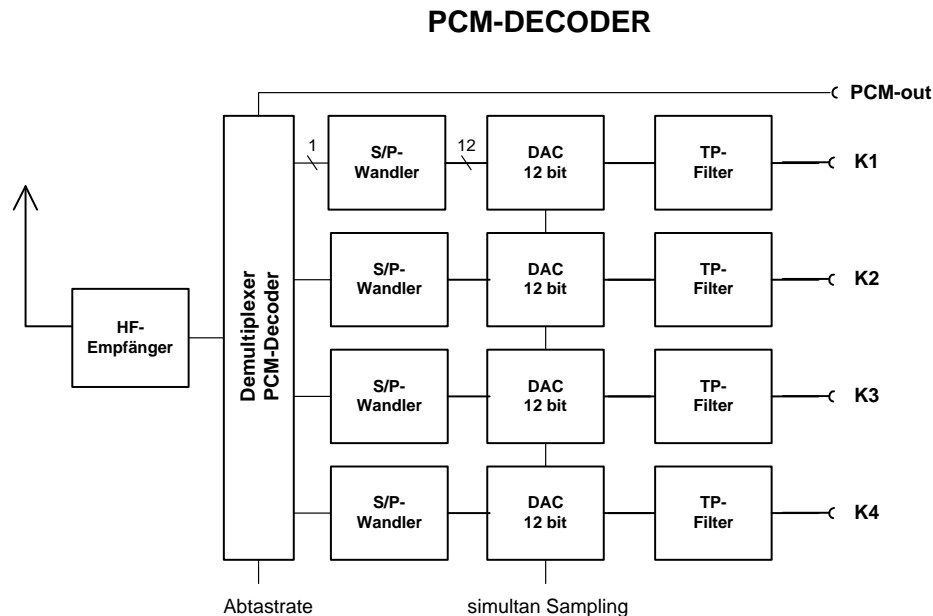


Bild 5: Blockschaltbild eines PCM-Mehrkanal-Decoders



Bild 5.1: 8-Kanal Telemetrie-Encoder mit 8 analogen Ausgängen +/-5V

3.1 Synchronisation von Encoder und Decoder

Damit der Decoder in der Lage ist, die zeitliche Zuordnung der digitalisierten Messwerte wieder zu erkennen, wird an eine bekannten Stelle des Abfragezyklus ein sog. Synchronwort eingefügt. Dieses Synchronwort besteht aus einer festen Länge von 4 Bit und wird zum Anfang jedes PCM-Pulsrahmens eingefügt. Der Decoder synchronisiert auf dieses Synchronwort und ist dadurch stets in exaktem Gleichlauf mit dem zugehörigen Sender. Außerdem liefert das Synchronwort über seine Codierung weitere nützliche Informationen, wie z.B. die Batteriekapazität des Senders. Bild 6 zeigt den Aufbau eines einzelnen Pulsrahmens, bestehend aus Synchronwort und 4 Kanälen. Die Länge des seriellen PCM-Pulsrahmens beträgt $4 \times 12 \text{ bit} + 4 \text{ bit} = 52 \text{ bit}$.

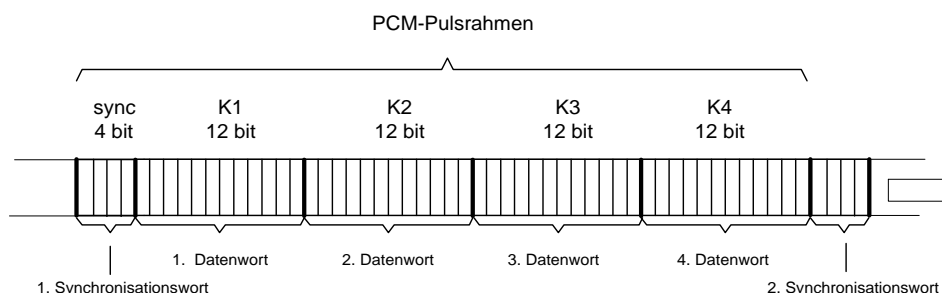


Bild 6: PCM-Rahmen mit Synchronisationswort, Beispiel: 4 Kanäle

Die max. übertragbare Signalbandbreite der einzelnen Kanäle steht in einem direkten Zusammenhang mit der Abtastgeschwindigkeit des Multiplexers. Tabelle 1 gibt einen Überblick der erreichbaren Signalbandbreiten (S_b) in Abhängigkeit der Abtastrate (A_{bt}) des PCM-Systems. Die jeweilige Rahmenlänge (s. Bild 6) errechnet sich aus der Anzahl der zu übertragenden Kanäle. Die Übertragungsrate eines Telemetriesystem ergibt sich somit aus dem Produkt von Abtastrate und Rahmenlänge.

Digitale Übertragungsgeschwindigkeit vs. Kanalbandbreite

$$\text{Übertragungsrate (bit/s)} = \text{Abtastrate (Hz)} \times \text{Rahmenlänge (bit)}$$

Bitrate	40 Kbit/s		80 Kbit/s		160 Kbit/s		320 Kbit/s		640 Kbit/s		1280 Kbit/s		2560 Kbit/s		Rahmenlänge
	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	Abt Hz	Sb Hz	
16 Kanal	204	45	408	95	816	190	1632	375	3265	750	6530	1500	13060	3000	196 bit
8 Kanal	400	95	800	190	1600	375	3200	750	6400	1500	12800	3000	25600	6000	100 bit
4 Kanal	770	190	1538	375	3077	750	6154	1500	12308	3000	24615	6000	49230	12000	52 bit
2 Kanal	1428	375	2857	750	5714	1500	11428	3000	22857	6000	45714	12000	91428	24000	28 bit

Abt. = Abtastrate (Hz), Sb = Signalbandbreite der Kanäle (Hz)

Rahmen errechnet sich, z.B. für 8-Kanäle:
 $8 \times 12 \text{ bit} = 96 \text{ bit} + 4 \text{ bit sync.} = 100 \text{ bit}$

Berechnung der Übertragungsrate, z.B. für 8 Kanäle:
 Bitrate = $6400 \text{ Hz} \times 100 \text{ bit} = 640 \text{ kbit/s}$

Tabelle 1: Zusammenhänge zwischen Übertragungsrate, Kanalanzahl und PCM-Rahmenlänge

Autor:
 Werner Schnorrenberg

Copywrite