

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

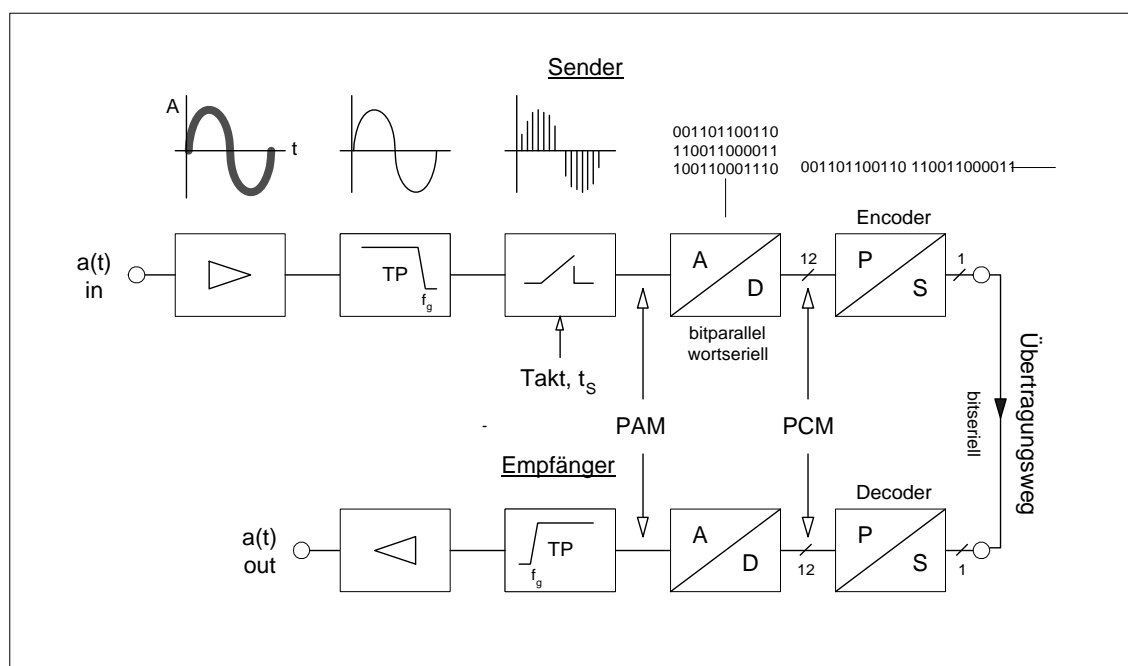


Bild 1: Blockschalbild einer 1-Kanal-PCM-Übertragungsstecke

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).

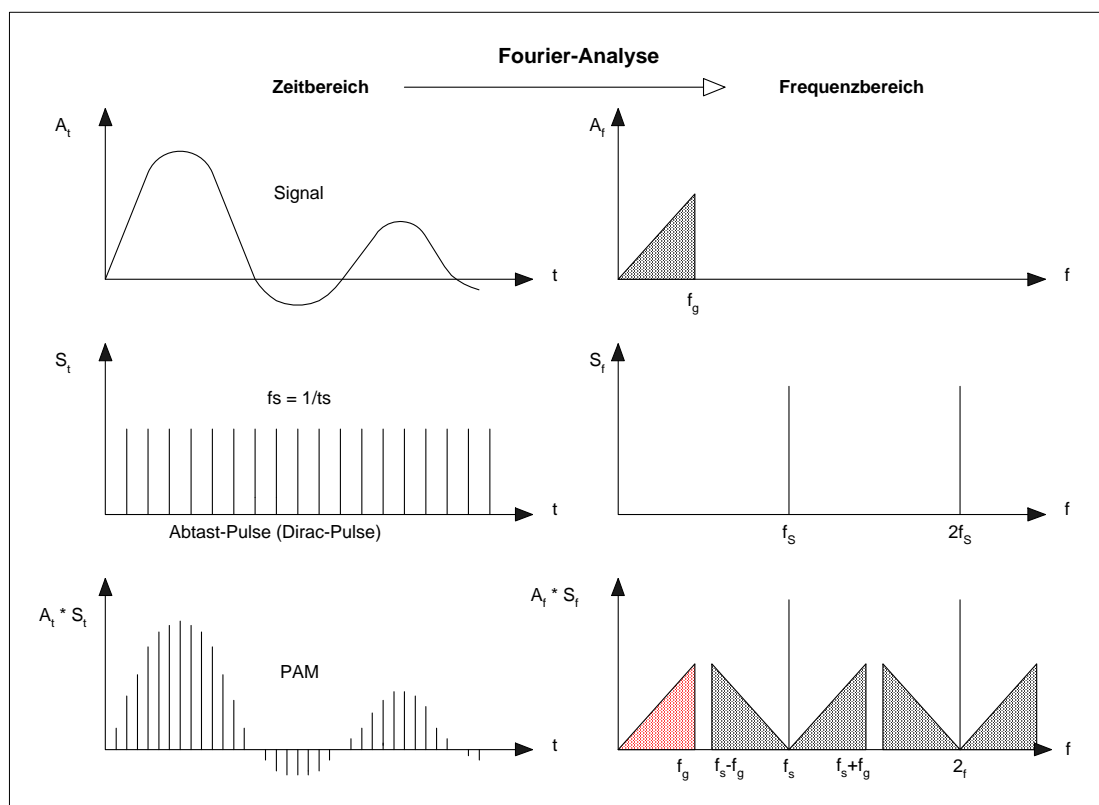


Bild 2: Abtastvorgang im Zeit- und Frequenzbereich

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 der 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 das 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.

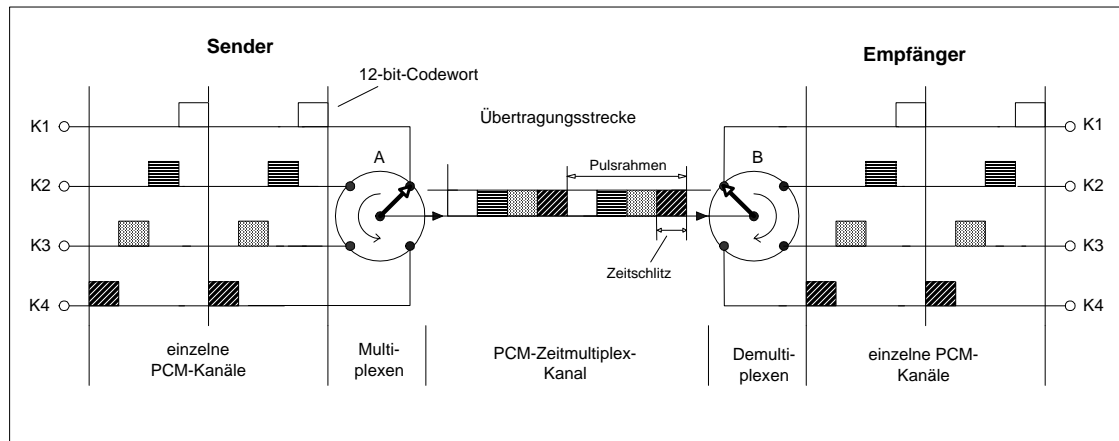


Bild 3: Prinzipdarstellung der Zeitmultiplexbildung und der Demultiplexbildung

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 Multiplexers 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

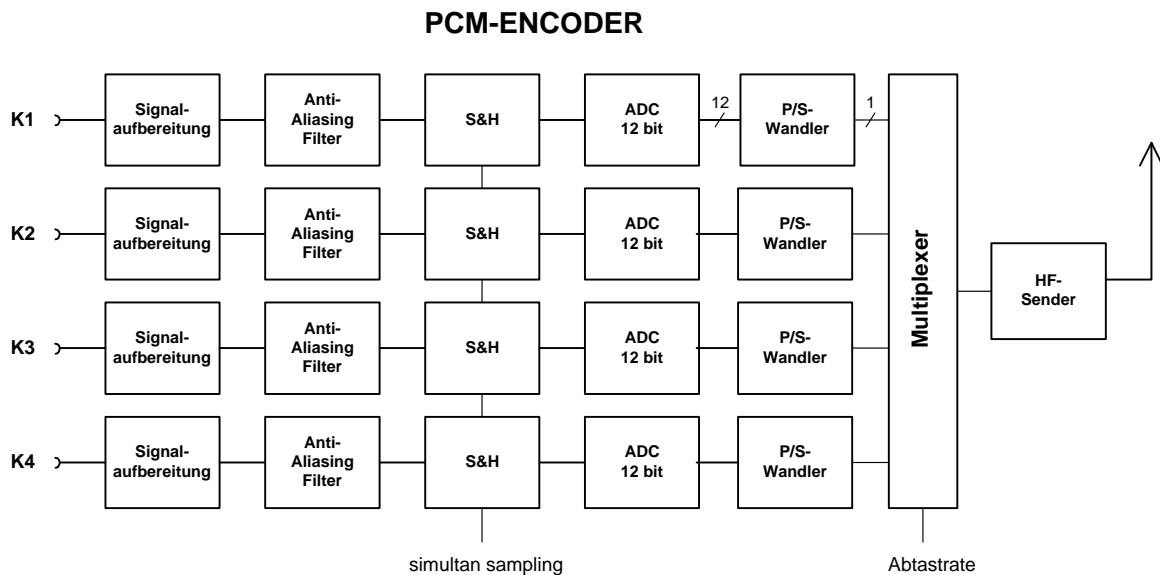


Bild 4: Blockschaltbild eines PCM-Mehrkanal-Encoders

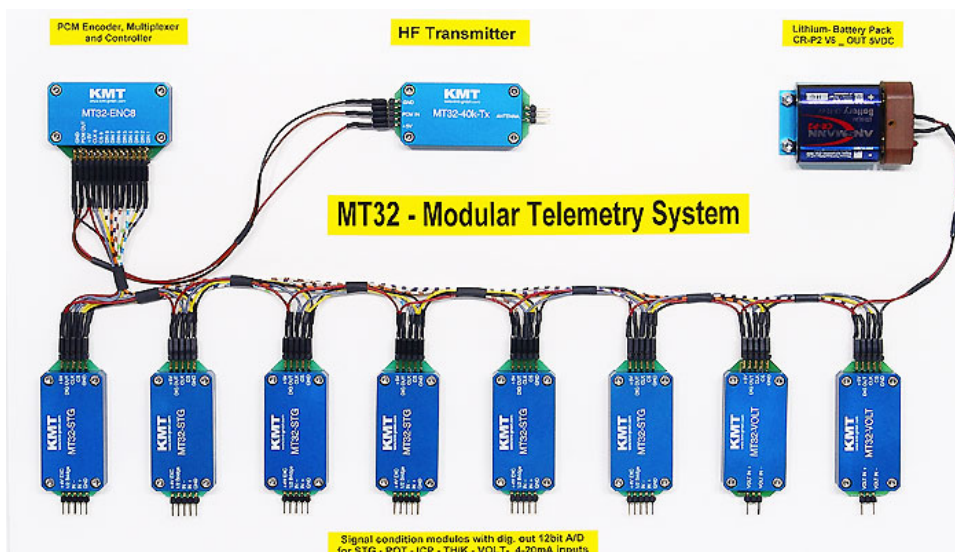


Bild 4.1: Beispiel einer modular aufgebauten 8-Kanal Telemetrie, mit A/D-Wandlern, Encoder und HF-Sender

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

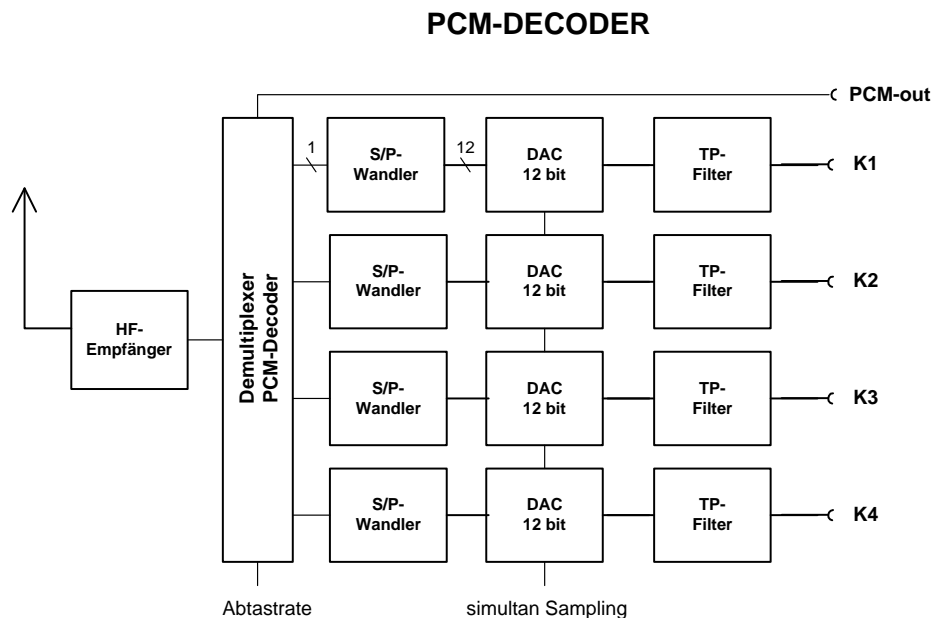


Bild 5: Blockschaltbild eines PCM-Mehrkanal-Decoders



Bild 5.1: modulare MT32 Telemetrie-Decoder

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 $4 \times 12 \text{ bit} + 4 \text{ bit} = 52 \text{ bit}$.

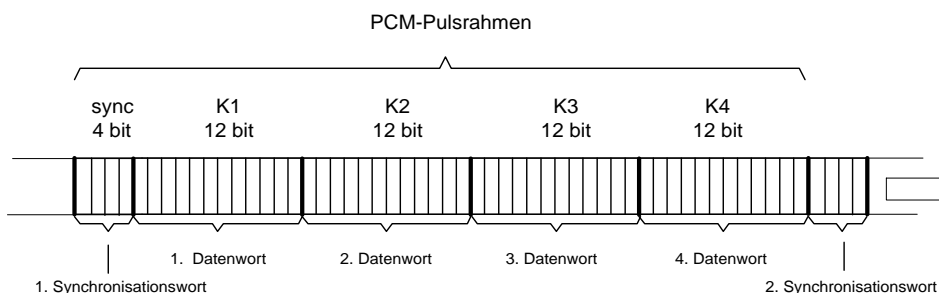


Bild 6: PCM-Rahmen mit Synchronisationswort, Beispiel: 4 Kanäle

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 (Abt) 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.

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

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

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

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

Beispiel:

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

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

4. HF-Übertragung

Die telemetrische Verbindung zwischen Encoder und Decoder erfolgt auf dem Funkweg mittels HF-Sender und -Empfänger. Für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Funkübertragungszwecke wurden sog. ISM-Bänder (Industry, Science and Medicine) freigegeben. Die Benutzung dieser Frequenzbänder bedürfen keiner Einzelgenehmigung, für den Anwender besteht der Vorteil einer kosten- und anmeldefreien allgemeinen Betriebserlaubnis. Die erlaubten Frequenzen liegen im 70cm-Band bei $433,92 \pm 0,8 \text{ MHz}$ und im S-Band bei 2.400 bis 2.483,5 MHz mit einer max. Strahlungsleistung von 10 mW im 70 cm-Band und 25 mW im S-Band. Die erzielbaren Reichweiten werden durch die Trägerfrequenz, den Aufbau der Antenne (Antennengewinn), dem Umfeld und der zu übertragende Datenbandbreite bestimmt. Im 70 cm-Band lassen sich im Freifeld mit $\lambda/4$ Stabantennen bei 8 Kanälen und einer Datenübertragungsrate von 320 kbit/s ca. 300m Entfernung überbrücken, mit Richtantennen > 1km. In einer bebauten Umgebung, wie in einer Maschinenhalle, wirken sich Dämpfung und Reflexion auf das Funkfeld aus, und die Entfernungen können kürzer ausfallen. Grundsätzlich gilt, dass bei schmalbandigen Übertragungssystemen, (niedrige Übertragungsrate, wenig Kanäle) die Übertragungreichweite höher ausfällt als bei breitbandigen Systemen (viele Kanäle, hohe Übertragungsraten).

Gegenüberstellung von MHz- und GHz-Telemetrie:

- 433 MHz:
 - max. 160 kbit/s = 16 Kanäle@150 Hz Signalfrequenz
 - max. 10 mW Sendeleistung = 500 - 1000 m
 - keine Störungen durch Reflexionen
 - keine individuelle Sendeerlaubnis

- 2.560 MHz:
 - typ. 2,56 Mbit/s = 16 Kanäle@2.400 Hz Signalfrequenz
 - max. 500 mW Signalfrequenz = 1.000 - 3.000 m
 - nur bei "optischer" Sichtverbindung
 - mit Richtstrahlantennen kann Entfernung vergrößert werden

4.1 Modulation

Die Modulation des HF-Senders erfolgt durch das digitale Signal des PCM-Coders. Ein High-Signal verschiebt die nominelle Trägerfrequenz um + 50 kHz, ein Low-Signal um -50 kHz. Eine solche Modulation des Trägersignals bezeichnet man als FSK (Frequenz Shift Keying), eine Sonderform der FM-Modulation. Bild 7 zeigt das Signal einer 8-Kanal-Telemetrie mit 160 kbit/s Übertragungsrate im Zeitbereich (links) und das resultierende HF-Spektrum im 70 cm-ISM-Band (rechts).

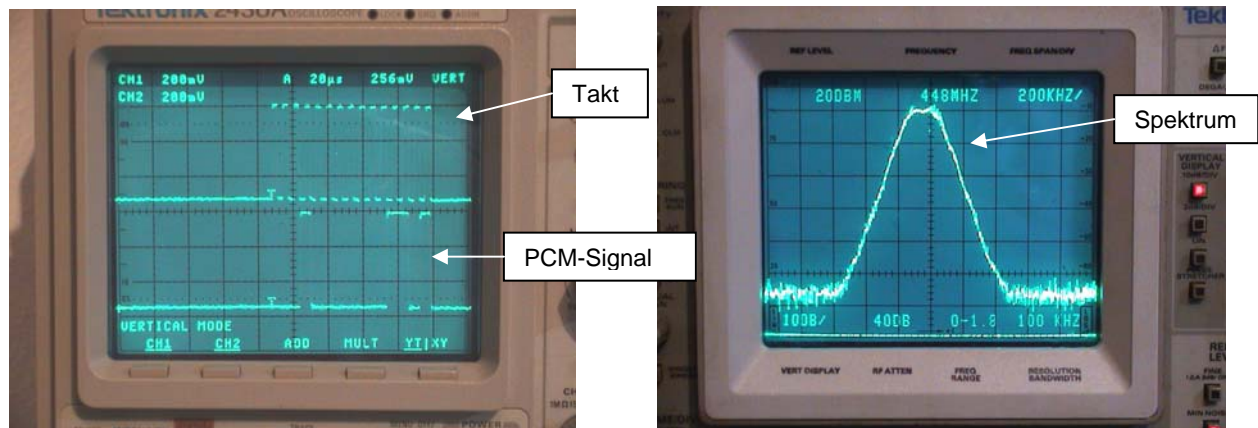


Bild 7: PCM-Signal im Zeitbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts)

Im Frequenzbereich ist zu erkennen, dass aufgrund der „harten“ FSK-Modulation ein relativ breites Spektrum erzeugt wird und für weitere Kanäle relativ wenig Platz bleibt. Bei -40 dBc Abstand vom Träger beträgt die spektrale Bandbreite ca. 700 kHz. Mit dieser Bandbreite muss die Selektion des Zwischenfrequenzverstärkers (ZF) des Telemetrie-Empfänger ausgestattet sein, damit im Abstand von +/-700 kHz noch ein weiterer, artgleicher Telemetrikanal platziert werden kann. Damit wäre die erlaubte Gesamtbandbreite (Bandbelegung) von 1,6 MHz schon fast erreicht. Als Faustregel gilt: Mit einer Abtastrate von 40 kbit/s können vier Telemetriesysteme (Bild 8) parallel und gleichzeitig im 70cm-Band betrieben werden, mit 160 kbit/s noch zwei Systeme.



Bild 8: Telemetrie-Sender (433/866MHz) mit Encoder (40kbit) und Signalaufbereitung für DMS (Dehnmessstreifen)

4.2 Diversity-Empfänger

Dem gegenüber stehen im S-Band über 80 MHz nutzbarer Trägerfrequenzbereich zur Verfügung, so dass selbst Datenströme mit 1280 kbit/s inklusive eventuell zusätzlicher Videosequenzen problemlos gleichzeitig in diesem Band übertragen werden können. Das Mikrowellen-ISM-Band ist jedoch empfindlich gegenüber Reflexionen und Mehrfachausbreitung (Bild 9). Diese Mehrwegausbreitung kann zu einem gleichzeitigen Empfang von laufzeitdifferierenden Signalanteilen führen, so dass sich bei der Signaldemodulation Signalverzerrungen und Signalauslöschungen ergeben können. Diese Effekte können besonders bei bewegtem Telemetriesender entstehen, so dass unsystematische, kurze Unterbrechungen der Übertragung auftreten.

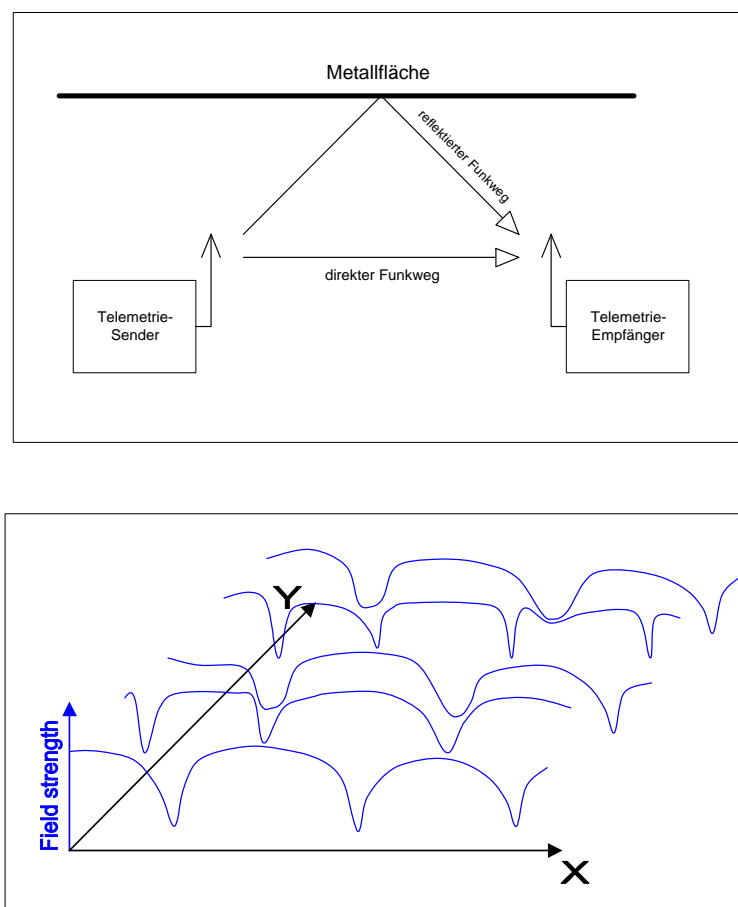


Bild 9: Entstehung von Signalauslöschung durch Reflexionen im Mikrowellen-S-Band

Diese Einflüsse lassen sich durch geeignete Auswahl und Anordnung von Antennen und/oder Einsatz von Diversity-Empfangsanlagen deutlich verringern (Bild 10). Diversity Empfangsanlagen arbeiten mit zwei HF-Empfängern, die auf eine gemeinsame Zwischenfrequenz von 21 MHz umsetzen. Durch einen speziellen Antennenkoppler (Combiner) werden die zwei unabhängigen Signal *phasengleich* addiert, wobei die Feldstärke des resultierenden Signals immer höher ist, als die der Eingangssignale (Bild 10).

S-Band-Telemetrie-Antennen sind zumeist als Richtantennen mit zirkularer Polarisation ausgeführt (Bild 11). Zirkular polarisierte Antennen (Bild 12) haben den Vorteil, unempfindlich gegenüber Polarisationsänderungen des elektromagnetischen Feldes zu sein und ein gleichbleibendes Feldstärkesignal zu liefern.

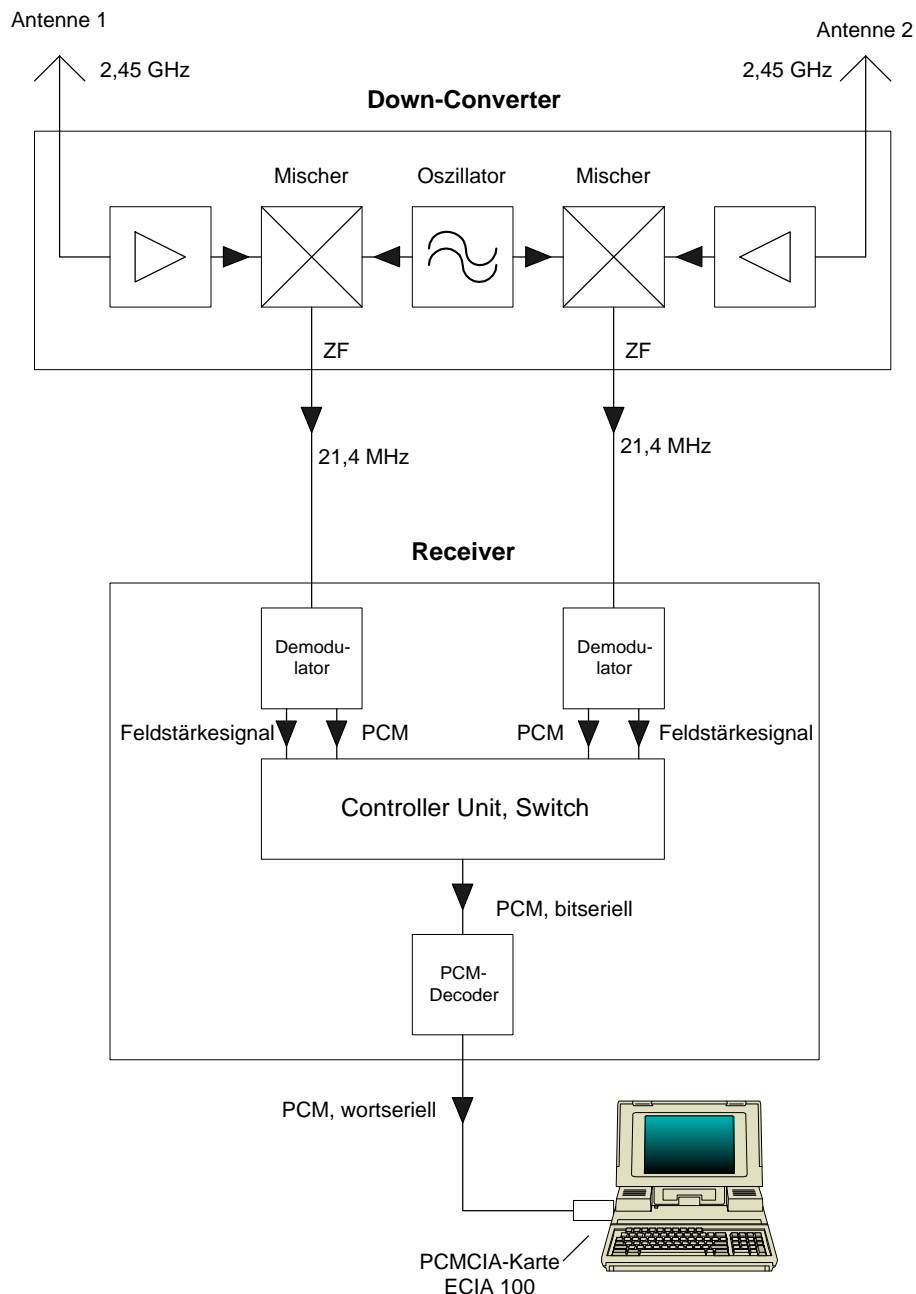


Bild 10: Prinzipschaltbild einer Diversity-Empfangsanaloge für den GHz-Bereich

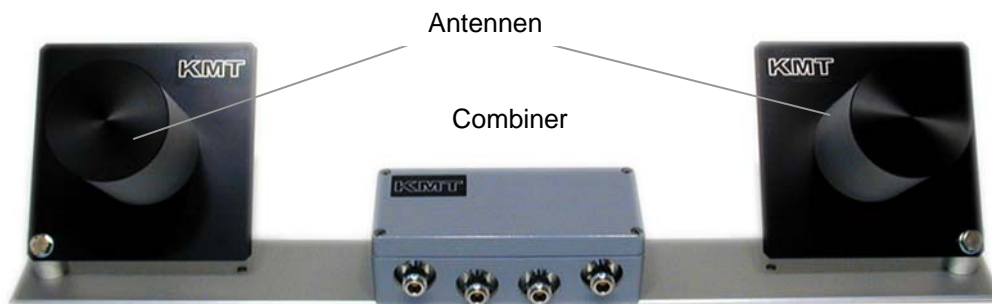


Bild 11: Diversity-Antennenanlage mit zwei S-Band-Empfangsantennen und Combiner



Bild 12: Telemetrie-Empfangsanlage mit vier zirkular polarisierten Rundumstrahlantennen und direkter, digitaler Einspeisung in das PCM-Interface eines Erfassungssystem

Werner Schnorrenberg
Juli 2009

Copywrite