



DVB-T in Theorie und Praxis

Das digitale terrestrische Fernsehen DVB-T (Digital Video Broadcast Terrestrial) wird in wenigen Jahren das analoge PAL-System abgelöst haben. Es wird dann zwar von der Mehrheit der Gebührenzahler empfangbar sein, aber beileibe nicht überall. Der Artikel informiert in Teil 1 über Technik und Nutzen und in Teil 2 über die Empfangbarkeit des digitalen terrestrischen Fernsehens.

DVB-T – das Überall-Fernsehen!

Das gute alte analoge terrestrische Fernsehen hat angesichts der Konkurrenz aus Orbit und Kabel in den letzten Jahren einen stetigen Rückgang verzeichnen müssen (Abbildung 1). Die digitale Nachfolgetechnik ist aber bereits im Vormarsch und bietet (zumindest in den Kernzonen der Verbreitung) Vorteile, mit denen die Konkurrenten vom Satelliten und aus dem Kabelnetz schon prinzipbedingt nicht mithalten können: Portabilität und Mobilität.

DVB – das digitale Fernsehen (Digital Video Broadcast) ruht auf drei Verbreitungssäulen: Satellit (DVB-S), Kabel (DVB-C) und Terrestrik (überirdische Sendestationen, DVB-T). In Vorbereitung ist zudem das Handy-Fernsehen DVB-H, welches als eine Variante von DVB-T anzusehen ist.

DVB-T – das Überall-Fernsehen! Mit diesem plakativen und zugleich deutlich übertreibenden Slogan wird mehr ein Wunsch als die Realität beschrieben (Abbildung 2).

Die Karte der Gebiete in Deutschland mit der Möglichkeit zum DVB-T-Emp-

fang gleicht eher einem extrem löchrigen Flickenteppich als einer lückenlos abgedeckten Bundesrepublik. Letzteres wird wahrscheinlich auch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit in absehbarer Zukunft nicht realisiert werden. Aber in den heute schon versorgten und in nächster Zukunft hinzukommenden Ballungsgebieten lebt eben ein Großteil der Bevölkerung, was zwar rechnerisch zu einem hohen Versorgungsgrad führt, aber wenig mit „Überall-Fernsehen“ zu tun hat. Gegen Ende 2005 werden knapp 50 Millionen Bundesdeutsche die Möglichkeit zum DVB-T-Empfang haben (Erreichbarkeit) und mittels etwa 2 Millionen DVB-T-Receivern davon Gebrauch machen (Abbildung 3). Der Fahrplan der bundesdeutschen DVB-T-Einführung zeigt, dass noch viel zu tun bleibt:

- Hamburg/Lübeck/Kiel 08.11.2004
- Rostock/Schwerin ab 2006?
- Bremerhaven/Bremen 24.05.2004
- Hannover/Braunschweig 24.05.2004
- Berlin/Potsdam 04.08.2003
- Halle/Leipzig 05.12.2005
- Erfurt/Weimar 05.12.2005
- Köln/Bonn/Ruhrgebiet 24.05.2004
- Mainz/Wiesbaden/Frankfurt 04.10.2004
- Mannheim ab 2006?
- Nürnberg 30.05.2005
- Stuttgart ab 2006?
- München 30.05.2005

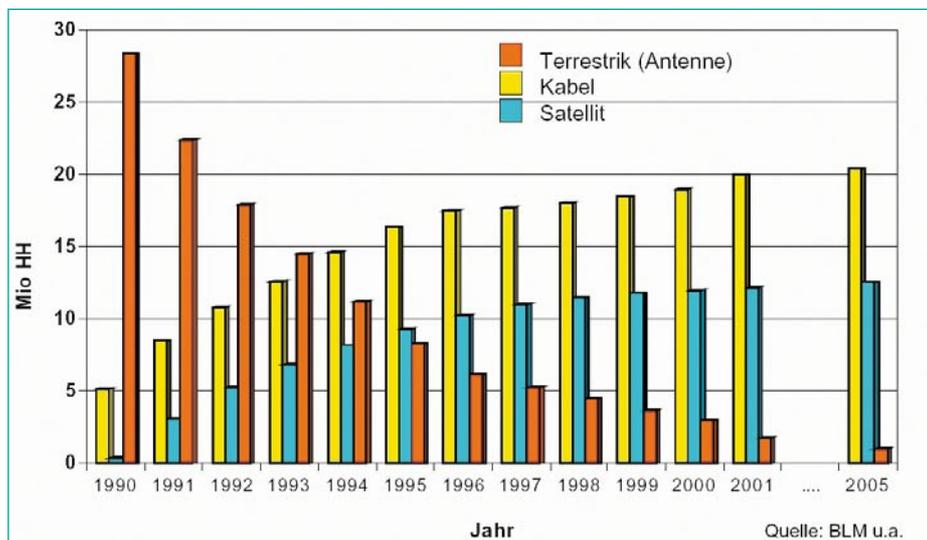


Bild 1: DVB-T wird das terrestrische Fernsehen wieder beleben!



Bild 2: Fernsehen überall verspricht DVB-T. Quelle: Medienbüro DVB-T-Einführung Norddeutschland

Wo DVB-T heute schon Realität ist, hat der Zuschauer eine Reihe von Vorteilen. Im Gegensatz zum Empfang aus dem Kabel oder von geostationären Satelliten ist prinzipiell auch mobiler und portabler terrestrischer Digitalempfang möglich. Die aus analogen Zeiten bekannten allgegenwärtigen Reflexionen gibt es zwar auch beim Digitalempfang, aber sie stellen meistens kein Problem dar. Vielmehr unterstützen Reflexionen (wenn sie innerhalb des so genannten Schutzintervalls beim Empfänger eintreffen) das direkt eingestrahlte Empfangssignal. Man spricht auch von konstruktiver Interferenz.

DVB-T-Technik im Überblick

DVB-T gehört zur Familie der DVB-Übertragungssysteme für Satellit (DVB-S), Kabel (DVB-C) und Terrestrik (DVB-T). In der Quellencodierung verwenden alle drei Varianten den MPEG-2-Standard zur Abtastung des Bildes und zur Audio-Video-Bitratenreduktion. Bild-, Ton- und Datensignale werden in paketierter Form in Datencontainern als gemeinsamer Bitstrom in einem Transportmultiplex gesendet. In der Anpassung an die Besonderheiten des jeweiligen Übertragungskanal (Kanalcodierung) unterscheiden sich die DVB-Systeme.

COFDM

Eine herausragende Besonderheit von DVB-T ist das verwendete Modulationsverfahren COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex). Es ist ein Mehrträger-Übertragungsverfahren. Die Grundidee besteht darin, das digitale Nutzsignal auf viele tausend orthogonale Träger gleichen Abstands aufzuteilen (dies geschieht durch eine inverse diskrete Fourier-Transformation iDFT), die parallel moduliert und in entsprechend schmalbandigen Unterkanälen (subchannels) mit der Breite des Trägerabstandes ausgestrahlt

werden. Das Leistungsdichtespektrum eines jeden digital modulierten Trägers hat einen derartigen si-Verlauf ($\sin[x]/x$), dass seine Nullstellen auf den Mittenfrequenzen aller benachbarten Unterkanäle zu liegen kommen (Abbildung 4). Das ist eine Folge der Orthogonalität (bezeichnet in der Mathematik das Konzept des Senkrechtstehens) der Trägerfrequenzen. Damit ist im Prinzip die geringstmögliche Interferenz zwischen den modulierten Symbolen sichergestellt.

Dem Begriff der Orthogonalität kann man durchaus etwas Anschauung abgewinnen. Drückt man den k-ten Träger als

$$\Psi_k(t) = e^{jk\Omega_{Nutz}t}$$

und einen beliebigen anderen Träger als

$$\Psi_l(t) = e^{jl\Omega_{Nutz}t}$$

aus, mit

$$\Omega_{Nutz} = 2\pi f_{Nutz} = 2\pi \frac{1}{T_{Nutz}}$$

sind die beiden orthogonal, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\int_t^{t+T_{Nutz}} \Psi_k(t) \cdot \Psi_l^*(t) dt = 0 \quad \text{für } k \neq l$$

$$= T_{Nutz} \quad \text{für } k = l$$

Dies ist technisch gesehen nichts weiter als eine Demodulation durch Abmischen

eines Trägers in das Basisband (Stichwörter: Zero Frequency, Homodyn-Empfänger, Direktumsetzung), indem man ihn mit der gleichen Frequenz ($k=l$) multipliziert und das Gleichnungsergebnis aufintegriert. Alle anderen Träger ergeben Überlagerungsfrequenzen (beat tones), die ganze Vielfache von Ω_{Nutz} sind und über das Integrationsintervall T_{Nutz} zu null aufintegriert werden. Damit kann ohne explizites Filtern jeder der Träger ohne gegenseitiges Übersprechen nur durch die Wahl eines geeigneten Trägerabstandes demoduliert werden. In der Praxis wird dies durch eine Diskrete Fourier-Transformation (DFT) erledigt.

Dieses Verfahren hat eine Reihe von Vorteilen:

- **Robustheit gegen frequenzselektive Störungen oder Signaleinbrüche**, weil davon nur einzelne Träger betroffen sind, deren Informationen meist durch die Fehlerschutzmechanismen rekonstruiert werden können.
- **Toleranz gegen Reflexionen**. Beim OFDM ist die Symboldauer wegen der parallelen Übertragung auf n Trägern – im Vergleich zu Einträgerverfahren – n-mal so groß. Das kann durch die Einführung eines Schutzintervalls (guard interval) vorteilhaft zur Tolerierung von Echos ausgenutzt werden. Bis zu einer maximal zulässigen Laufzeitdifferenz zwischen Originalsignal und reflektiertem Signal, die durch das Schutzintervall gegeben ist, verschlechtert die Reflexion den Empfang nicht.



Bild 3: Ein hoher Versorgungsgrad bedeutet nicht zugleich umfassende Flächendeckung. Quelle: www.ueberall-tv.de

Tabelle 1:

Parameter	Modus							
	2k				8k			
Symboldauer $T_s/\mu\text{s}$	224				896			
Trägerabstand $\Delta f_T/\text{kHz}$	4,4643				1,116			
Trägeranzahl (theoretisch)	2048				8192			
Trägeranzahl (real)	1705				6817			
Belegte Bandbreite B/MHz	7,609				7,612			
Gesamtsymboldauer $T_{\text{ges}}/\mu\text{s}$	280	262	238	231	1120	1008	952	924
Schutzintervall $T_G/\mu\text{s}$	56	28	14	7	224	112	56	28
T_G/T_s	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Maximaler Senderabstand /km	16,8	8,4	4,2	2,1	67,2	33,6	16,8	8,4

Z. B. toleriert OFDM mit einem Guard-Intervall von 250 μs Reflexionen mit einem Lauflängenunterschied von bis zu 75 km. Echos mit längerer Laufzeitdifferenz liefern Störbeiträge. Diese sind allerdings gering, da die Stärke des Echos infolge des langen Ausbreitungsweges entsprechend abgenommen hat.

- **Gleichwellenbetrieb.** Ein Gleichwellenkanal mit demselben Programm-inhalt wirkt sich ebenso aus wie ein Echo. Es ist also ein Netz von Sendern möglich, die auf dem gleichen Kanal betrieben werden (SFN: Single Frequency Network). Das bietet besonders beim mobilen Empfang Vorteile, da es beim Wechsel von einem Senderversorgungsbereich zum anderen zu keinen Empfangsunterbrechungen kommt.

Für die deutschen DVB-Ausstrahlungen stehen der sog. 2-k- und 8-k-Modus zur Verfügung. Die Übertragungsparameter im 8-MHz-Kanal (UHF) zeigt Tabelle 1. Die grün hinterlegten Parameter werden in Deutschland zur Zeit am meisten genutzt.

Als Modulationsverfahren sind bei DVB-T QPSK, 16-QAM oder 64-QAM vorgesehen. Die übertragbaren Nutz-Datenraten in einem 8-MHz-DVB-T-Kanal in Abhängigkeit von Coderate und Schutzintervalllänge zeigt Tabelle 2.

Im praktischen Einsatz wird am häufigsten die 16-QAM eingesetzt (Abbildung 5). Das bedeutet, dass ein Symbol durch 4 Bit repräsentiert wird. Mit einem Fehlerschutz (FEC: Forward Error Correction) von 2/3 (zwei Nutzbits werden durch ein Fehler-schutzbit geschützt) resultiert daraus eine Datenrate von 14,75 MBit/s. Im 7-MHz-Kanal (VHF) wird der Fehlerschutz auf 3/4 verringert, was zu einer nur unbedeutend kleineren Datenrate von 14,51 MBit/s

Tabelle 2:		Netto-Datenrate Mbit/s			
		Schutzintervall/ T_G			
Modulation	Coderate	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
32-QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,74	31,67

Übertragbare Nutz-Datenraten in einem 8-MHz-DVB-T-Kanal in Abhängigkeit von Coderate und Schutzintervalllänge

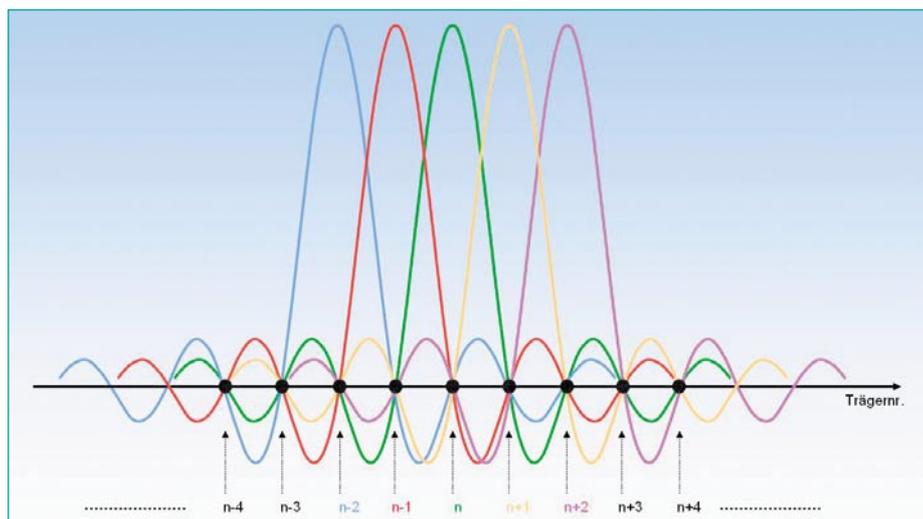


Bild 4: Das Frequenzdichtespektrum eines jeden Symbols hat dort sein Maximum, wo alle anderen Nullstellen haben.

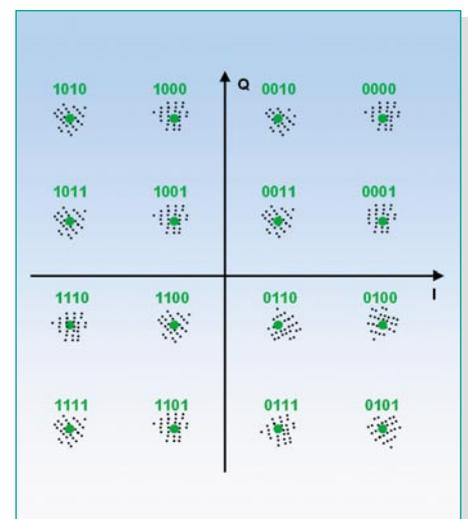


Bild 5: 16-QAM wird am häufigsten bei DVB-T in Deutschland verwendet.

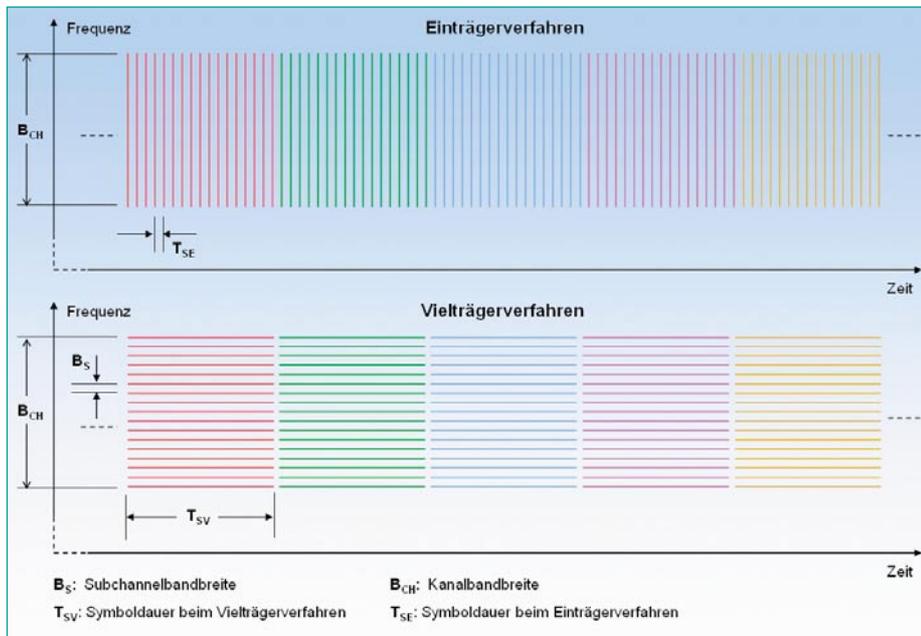


Bild 6: Prinzipieller Vergleich zwischen Ein- und Mehrträger-Übertragungsverfahren

führt. Diese Parameter ermöglichen die digitale Übertragung von 4 TV-Programmen in PAL-Qualität über einen Kanal im VHF-/UHF-Bereich.

Für die Senderbetreiber ergeben sich geringere Sendeleistungen bei effizienterer Frequenznutzung und gleichem Versorgungsradius, nicht zuletzt durch den Überlagerungsgewinn infolge sich konstruktiv unterstützender Einstrahlungen aus benachbarten Senderstandorten. Die Programmanbieter profitieren deshalb von günstigeren Verteilungskosten für ihr Angebot.

Symboldauer und Bandbreite

Bei einem Einträger-Modulationsverfahren steht einem Symbol die volle Übertragungsbandbreite des Kanals zur Verfügung. Ein Vielträger-Modulationsverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass der Datenstrom in kleinere Symbole zerlegt wird, die dann auf unterschiedliche orthogonale Träger aufmoduliert werden. Je mehr Trägerfrequenzen zur parallelen Übertragung zur Verfügung stehen, umso länger kann die Dauer jedes Symbols sein,

was die Verfälschung des übertragenen Symbols durch Echos und Gleichkanalstörungen aus benachbarten Funkzellen in einem gewissen Umfang erlaubt. Je mehr Bit ein Symbol repräsentiert, umso weniger Zeit steht für seine Übertragung zur Verfügung, was wiederum die zulässige Echolaufzeit verkürzt. Abbildung 6 illustriert dies an einem Vergleich zwischen Ein- und Mehrträgerverfahren. Die Zahl der Träger ($2N+1$, in der Abbildung $N=8$) ist nach oben begrenzt, weil die damit korrespondierende Symboldauer nicht so lang werden darf, dass die Kanaleigenschaften in diesem Zeitintervall nicht mehr konstant wären. Auf jeden Fall ist die Symboldauer T_{SV} beim Vielträgerverfahren mindestens $(2N+1)$ -mal so lang wie die Symboldauer beim Einträgerverfahren:

$$T_{SV} \geq (2N + 1)T_{SE}$$

Die Bandbreite eines Subkanals entspricht mindestens dem $(2N+1)$ ten Teil der Kanalbandbreite, weil sich die Subkanäle etwas überlappen können:

$$B_S \geq \frac{B_{CH}}{2N + 1}$$

Wenn bei beiden Verfahren die gleiche Informationsmenge übertragen werden soll, müssen in Abbildung 6 die Flächen aus Bandbreite und Symboldauer gleich sein:

$$B_S \cdot T_{SV} \geq B_{CH} \cdot T_{SE}$$

Dies ist nichts anderes als das Zeit-Bandbreite-Gesetz der Nachrichtentechnik, welches besagt: „Die Bandbreite eines Signals oder Übertragungssystems verhält sich reziprok zur jeweils benötigten Übertragungszeit.“

Schutzintervall und konstruktive Interferenz

Die Überlagerung von Sinusschwingungen gleicher Frequenz, aber unterschiedlicher Phase und Amplitude führt wiederum zu einer Sinusschwingung mit einer resultierenden Phase und Amplitude. Das erklärt, warum alle Echos und Signale aus benachbarten Funkzellen des SFN (Single Frequency Network: Gleichwellennetz), die ja zeitverzögerte und verkleinerte Abbilder der Hauptsignalschwingung eines OFDM-Symbols sind, nach dem Einlaufen des letzten Nachzüglers das Hauptsignal unterstützen. Davon führen sie zu seiner Verformung. Wenn man nun in einem gewissen Zeitabschnitt, der länger als die größte zu berücksichtigende Echolaufzeitdifferenz sein muss, das empfangene

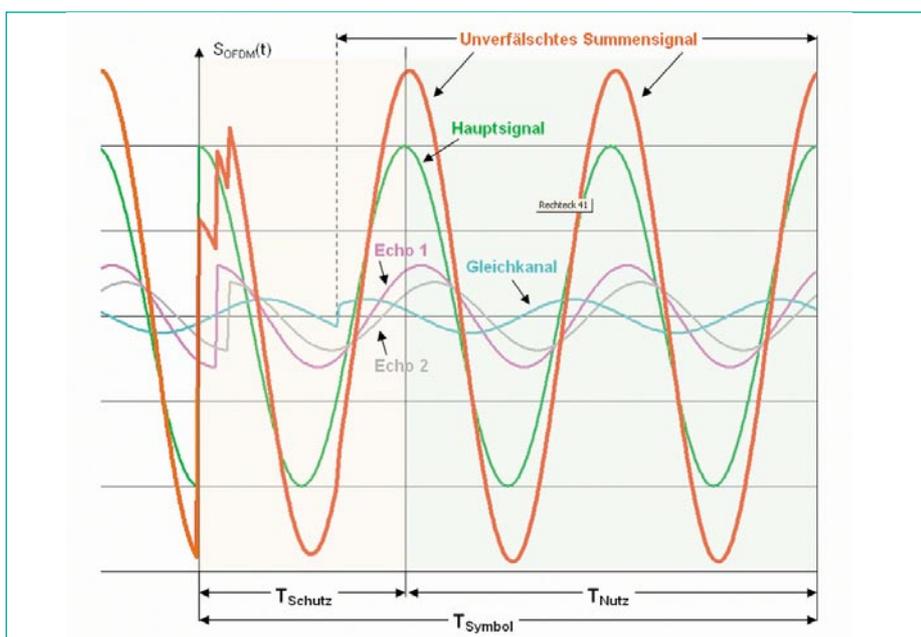


Bild 7: Im Schutzintervall müssen alle relevanten Reflexionen und Gleichkanalstörungen eingelaufen sein, sonst wird das Summenschignal im Nutzintervall verfälscht.

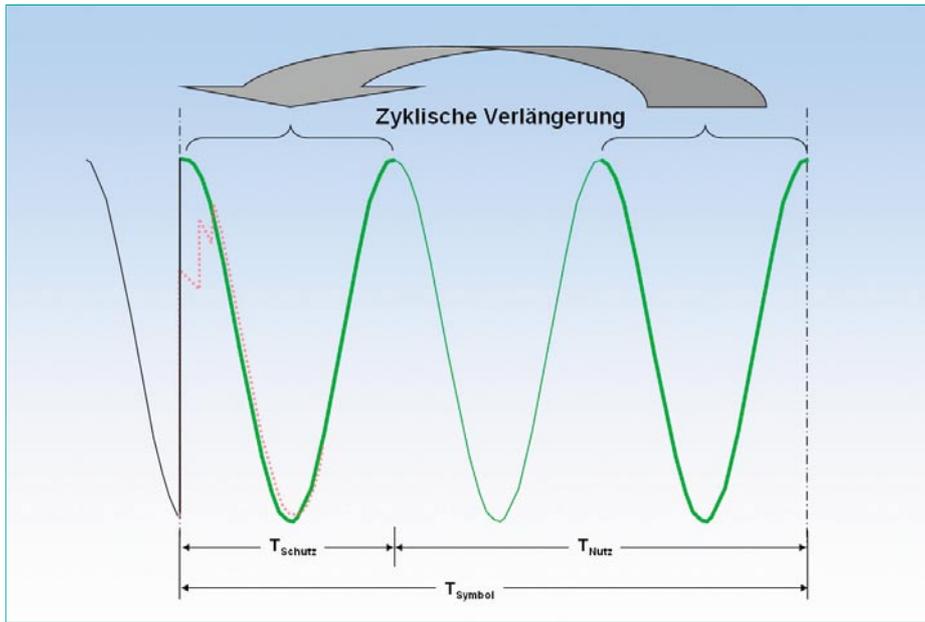


Bild 8: So wird die durch das Schutzintervall verlorene Zeit zur Symbolgewinnung ausgeglichen.

Summensignal nicht ausgewertet, können die verformten Signalanteile keine fehlerhaften Auswirkungen haben. Dieser Zeitabschnitt wird Schutzintervall (guard interval) genannt. Abbildung 7 zeigt modellhaft an einem Subchannel, wie sich zwei Echos und ein gleichwelliges Signal aus einer benachbarten Funkzelle (mit der kleinsten Amplitude und der größten Laufzeitdifferenz) mit dem Grundsignal zu einem resultierenden Eingangssignal für den Empfänger summieren. Erst wenn das letzte Signal (aus der Nachbarzelle) eingelaufen ist, beginnt die ungestörte stationäre konstruktive Überlagerung.

Um die durch das Schutzintervall verkürzte Zeit zur Symbolauswertung zu verlängern, wird ein gleich langer ungestörter Teil vom Ende des Symbols zum Ersatz der gestörten Summenspannung im Be-

reich des Schutzintervalls eingefügt. Abbildung 8 zeigt diese so genannte „Zyklische Verlängerung“. Der Gesamtzusammenhang in der Folge von Symbolen ist in Abbildung 9 dargestellt.

Fehlerschutz

Die Vielzahl der zeitlich veränderlichen Einflüsse, die auf ein DVB-T-Signal einwirken, bis es an der Antennenbuchse eines Receivers angekommen ist, erfordert Fehlerkorrekturmechanismen, die denen beim Satellitenfernsehen recht ähnlich sind.

Nach der Quellencodierung der einzelnen Programme und ihrer Zusammenfassung in einem Transportstrom (Multiplexbildung), muss dieser an die Eigenschaften des Übertragungskanals angepasst werden, um eine möglichst bitfehlerarme Übertra-

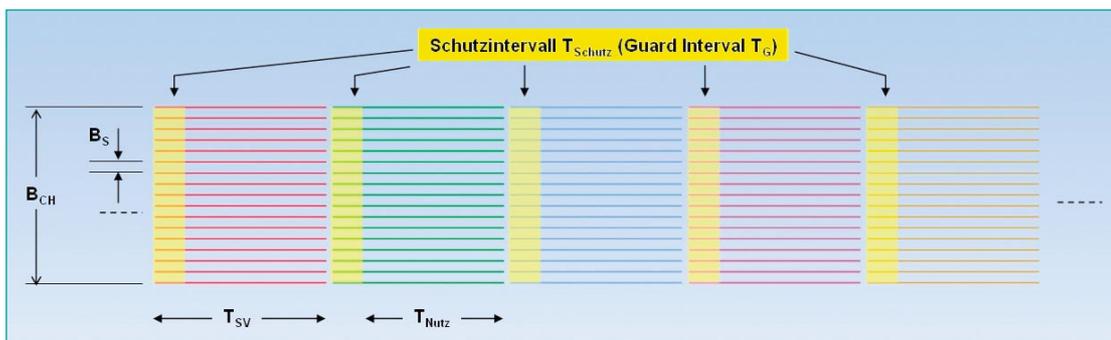


Bild 9: Das unvermeidliche Schutzintervall verringert die Übertragungseffizienz.

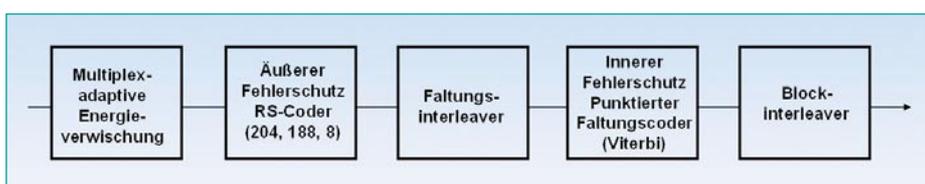


Bild 10: Innerer und äußerer Fehlerschutz bei DVB-T

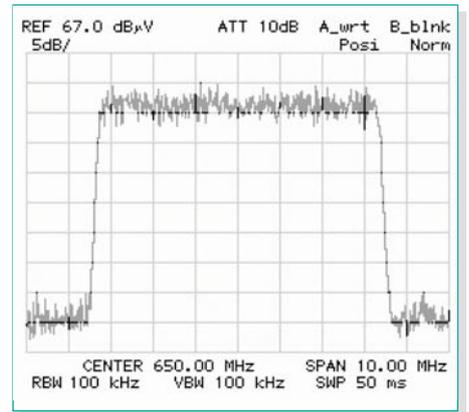


Bild 11: Im Idealfall ist ein DVB-T-Spektrum rechteckförmig.

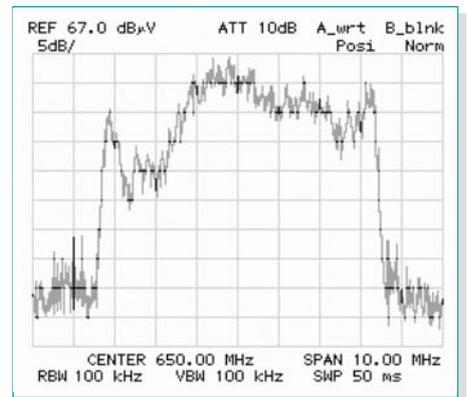


Bild 12: In der Realität ist das DVB-T-Spektrum durch verschiedene Einflüsse oft stark wellig.

gen zu gewährleisten. Dies ist Aufgabe der Kanalcodierung (Abbildung 10), die zwar die Nutzdatenrate verringert, aber Übertragungsfehler infolge von Störadditionen beim Passieren des Übertragungskanals in gewissem Umfang korrigierbar macht.

Das Ergebnis dieser Maßnahmen ist ein rechteckförmiges Spektrum mit gleichmäßiger Energiedichte, welches ohne Störun-

gen auf dem Übertragungskanal (Echos, Gleichkanalsignale, Schwund ...) idealerweise auch so beim Empfänger ankommt (Abbildung 11). Die Realität sieht oft anders aus (Abbildung 12).

Im zweiten Teil dieses Artikels werden die Besonderheiten und Probleme beim DVB-T-Empfang beleuchtet. **ELV**