



# Satellitenempfang, Teil 9

## – Verstärker –

**Wenn am Eingang eines Satellitenreceivers ein Signal zwischen 42 und 65 dB $\mu$ V anliegt, ist die Welt pegelmäßig in Ordnung. Das lässt sich meistens mit einem Multischalter ohne zusätzlichen Verstärker bewerkstelligen. In Einzelfällen kann aber der Einsatz eines Verstärkers erforderlich werden. Dabei muss man sich allerdings bewusst sein, dass Verstärker den Signalpegel nicht nur anheben, sondern das verstärkte Signal mehr oder weniger stark verfälschen. Dafür sind die nicht idealen Eigenschaften der aktiven Verstärkerelemente verantwortlich, denen wir uns im Folgenden widmen wollen.**

### Nicht ohne Not!

Meist ist der Pegel der 1. Sat-ZF am Ausgang des LNBs (ca. 75 dB $\mu$ V) für kleine bis mittelgroße Empfangsanlagen ausreichend hoch, um ein Verteilnetz bis zum Teilnehmer ohne zusätzliche Verstärkung realisieren zu können. Bei einem wünschenswerten Pegel an der Teilnehmersteckdose von ca. 42 bis 65 dB $\mu$ V steht dann gut 30 dB Pegelreserve zur Verfügung, die von den passiven Komponenten des Verteilsystems aufgezehrt werden darf. In den allermeisten Fällen lässt sich die Ursache eines zu niedrigen Empfangspegels

in einem fehlerhaften Aufbau der Anlage finden. Es kommen in Frage: ungenau ausgerichtete Antenne, falsch montierte F-Stecker, zu stark dämpfendes Kabel (20 bis 30 dB @ 1000 bis 2000 MHz pro 100 m Leitungslänge ist ein guter Mittelwert), ungeschickte (zu lange) Leitungsführung, falsche Dosen (z. B. Abzweigdose anstelle von Stichdose) usw. Wenn all dies aber einer Überprüfung standhält, ist ein Verstärker erforderlich.

In ausgedehnten Verteilnetzen für viele Teilnehmer, mit langen Kabelwegen, Verzweigungen und Durchschleifungen, kann die Notwendigkeit entstehen, einen abgefallenen Pegel wieder anzuheben

oder am Eingang längere Kabelstrecken so weit anzuheben, dass am anderen Ende ein ausreichend starkes Signal zur Verfügung steht. Aber Vorsicht: Verstärker fügen dem Signal unerwünschte Anteile wie Rauschen, Klirren, Intermodulationen, Verzerrungen etc. hinzu, die speziell bei digitalem Empfang zur Verringerung der Schlechtwetterreserven und zu „unerklärlichen“ Empfangsausfällen führen.

### Mehr Programme – weniger Pegel!

Eine der wichtigsten Kenngrößen eines Verstärkers sind sein maximaler Ein- und Ausgangspegel. Immer noch geben viele

Hersteller den maximalen Ausgangspegel bei Aussteuerung mit 3 Kanälen im Nutzband an. Das war zu Zeiten eines mit wenigen Kanälen belegten VHF/UHF-Bandes zu rechtfertigen. Heute jedoch, wo die 1. Sat-ZF lückenlos gefüllt ist, muss dem durch eine Verringerung sowohl des maximalen Eingangs- als auch Ausgangspegels Rechnung getragen werden. Andernfalls entstehen Intermodulationsprodukte (auf die wir gleich eingehen), welche die Signalqualität beeinträchtigen. Ganz ähnlich verhält es sich beim Tuner des Satellitenreceivers. Auch er besitzt eine breitbandige Eingangsverstärkerstufe, die mit zunehmender Zahl der Träger im ansteuernden Spektrum immer schwächer angesteuert werden darf.

Die Pegelreduktion kann in der Praxis durch Formel 1 beschrieben werden:

$$\frac{p_n}{dB\mu V} = \frac{p_{max}}{dB\mu V} - 7,5 \cdot \log(n-2) \quad \text{für } n \geq 3$$

Dabei ist  $p_n$  der Maximalpegel bei Aussteuerung mit  $n$  Trägern und  $p_{max}$  der Pegel mit 3 Trägern (meist Herstellerangabe).

Nimmt man beispielsweise eine Anzahl von  $n = 32$  Trägern in der 1. Sat-ZF an, und setzt  $p_{max} = 75 \text{ dB}\mu\text{V}$  an, ergibt sich Formel 2:

$$p_{32} = 75 \text{ dB}\mu\text{V} - 7,5 \cdot \log(30) \text{ dB}\mu\text{V} = 63,9 \text{ dB}\mu\text{V}$$

Zur überschlägigen Abschätzung leistet die **Faustformel „Verdopplung der Trägeranzahl = 3 dB Pegelreduzierung“** gute Dienste.

Dies entspricht durchaus den praktischen Beobachtungen. Bei Pegeln  $< 65 \text{ dB}\mu\text{V}$  gibt es normalerweise keine Probleme durch Übersteuerung des Receivers. Dagegen reagieren manche Receiver bei höheren Pegeln mit Intermodulationen, besonders wenn die Pegel in der 1. Sat-ZF stark schwanken (durch Welligkeit des Amplitudenfrequenzgangs und/oder Schräglage des Spektrums). Will man also auf „Nummer

Sicher“ gehen, empfiehlt es sich deshalb, anstatt der in Norm EN 50083 vorgesehenen oberen Pegelgrenze von  $77 \text{ dB}\mu\text{V}$  nur maximal  $65 \text{ dB}\mu\text{V}$  am Ausgang der Antennensteckdose einzuplanen.

Soweit – so schlecht! Aber die Praxis hält auch Trost bereit. Es zeigt sich nämlich, dass der in der Norm geforderte Mindestpegel von  $47 \text{ dB}\mu\text{V}$  für die modernen Satellitenreceiver zu hoch angesetzt ist. Die meisten Receiver mit ihrer hohen Empfindlichkeit liefern selbst bei  $40 \text{ dB}\mu\text{V}$  noch ein einwandfreies Ergebnis.

**Fazit: In der Praxis sollte man für den Nutzpegel am Receiver Eingang eine Spanne von 42 bis 65 dBμV ansetzen.**

## Rauschen

Rauschen ist des Nachrichtentechnikers natürlicher Feind. Rauschen ist prinzipiell unvermeidbar, weil es auf die Wärmebewegung von Elektronen in elektrischen Leitern zurückgeht. Es gibt aber auch andere Rauschquellen, wie das thermische Rauschen, das von der warmen Erde abgegeben und teilweise von der Antenne aufgenommen wird. Uns interessiert hier nur das thermische Rauschen in den aktiven Komponenten der Sat-Anlage. Es ist abhängig von der Messbandbreite und der Temperatur. Die am Eingang wirksame Rauschleistung ergibt sich aus der Rauschleistung eines Widerstandes mit  $4 \text{ k}\Omega$ , von der bei Leistungsanpassung ein Viertel verfügbar ist:

$$P = k \cdot T \cdot B \quad \text{Rauschleistung}$$

mit  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}}$  Boltzmannkonstante

$$B = \text{Bandbreite in Hz} \left( \frac{1}{\text{s}} \right) \text{ und}$$

$$T = \text{Temperatur in K (Kelvin)}$$

Bei einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $273,15 \text{ K} + 20 \text{ K} = 293,15 \text{ K}$ ) und einer Bandbreite von  $1 \text{ Hz}$  folgt daraus eine thermische Rauschleistung gemäß Formel 4:

$$P = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}} \cdot 293,15 \text{ K} \cdot 1 \frac{1}{\text{s}} = 4,05 \cdot 10^{-21} \text{ W}$$

Der daraus resultierende Rauschleistungspegel ergibt sich aus Formel 5:

$$p = 10 \cdot \log \left( \frac{4,05 \cdot 10^{-18} \text{ mW}}{1 \text{ mW}} \right) \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$$

$$= -173,93 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$$

Der thermische Rauschleistungspegel an einem Empfängereingang ist somit  $-174 \text{ dBm}$  pro Hertz Bandbreite. Er hängt nicht von der Größe des Eingangswiderstands ab, wohl aber von der Bandbreite, was in der logarithmischen Pegeldarstellung der Bandbreitenfaktor  $b$  berücksichtigt (Formel 6):

$$b = 10 \cdot \log \left( \frac{B}{\text{Hz}} \right) \text{ dB}$$

bzw.

$$p = -174 \text{ dBm} + b$$

Ein Beispiel:

Die Eingangsstufe eines Tuners in einem Satellitenreceiver hat eine Bandbreite von  $1200 \text{ MHz}$ .

Der Bandbreitenfaktor beträgt folglich  $90,8 \text{ dBm}$  (Formel 7):

$$b = 10 \cdot \log(1.200.000.000) \text{ dB} = 90,8 \text{ dB}$$

bzw.

$$p = -174 \text{ dBm} + 90,8 \text{ dB} = -83,2 \text{ dBm}$$

Die vom Receiver über seine breitbandige Eingangsstufe aufgenommene Rauschleistung beträgt also  $-83,2 \text{ dBm}$ .

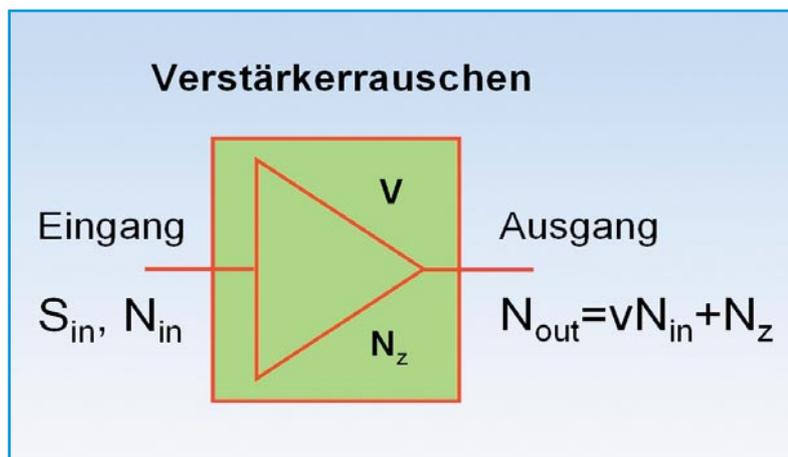
Wir wollen das etwas vertiefen, indem wir einen Verstärker betrachten, der gekennzeichnet ist durch seine Verstärkung  $v$  (Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangssignal) und dem Zusatzrauschen  $N_z$ , das er dem verstärkten Eingangssignal hinzufügt (Abbildung 1).

Das Rauschmaß NF (noise figure) dieses Verstärkers ist definiert als das mit 10 multiplizierte logarithmierte Verhältnis von Eingangsstörabstand zu Ausgangsstörabstand (Formel 8):

$$\frac{NF}{\text{dB}} = 10 \cdot \log \left( \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{\frac{S_{out}}{N_{out}}} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{v \frac{S_{in}}{vN_{in} + N_z}} \right)$$

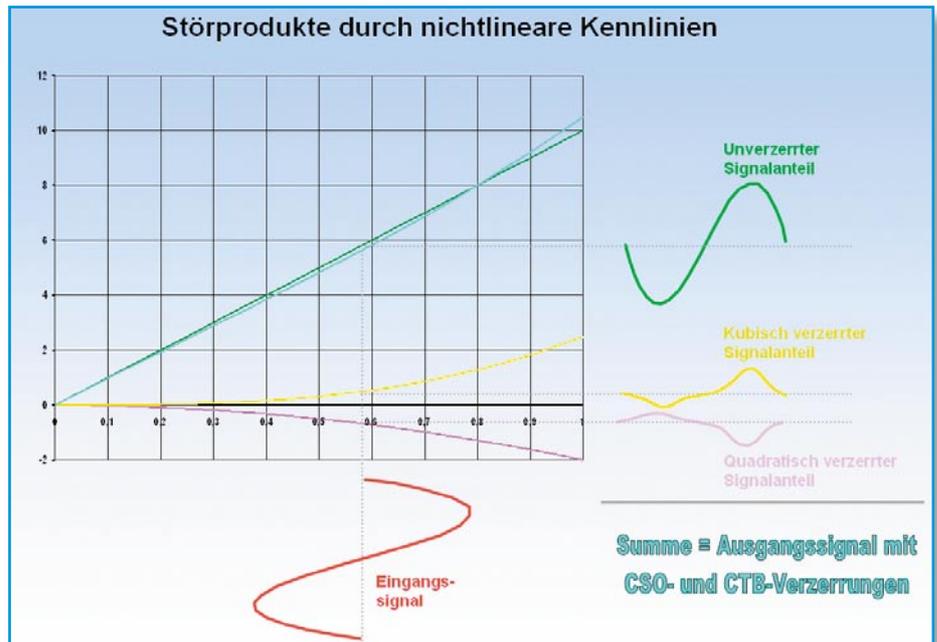
$$= 10 \cdot \log \left( 1 + \frac{1}{v} \frac{N_z}{N_{in}} \right) \quad \text{Rauschmaß}$$

Das Argument des Logarithmus wird in Formel 9 als Rauschzahl  $F$  (lineare Größe!) bezeichnet:



**Bild 1: Verstärkerrauschen**

**Bild 2:**  
Störprodukte durch nichtlineare Kennlinien



$$F = 1 + \frac{1}{v} \frac{N_z}{N_{in}}$$

Den zweiten Term nennt man Zusatzrauschzahl  $F_z$  (Formel 10):

$$F_z = \frac{1}{v} \frac{N_z}{N_{in}} \quad \text{Zusatzrauschzahl}$$

Es gilt also die Formel 11:

$$\begin{aligned} \frac{NF}{dB} &= 10 \log F = 10 \log \left( 1 + F_z \right) \\ &= 10 \log \left( 1 + \frac{1}{v} \frac{N_z}{N_{in}} \right) \end{aligned}$$

Man erkennt an der Formel, dass für den Idealfall eines rauschfreien Verstärkers ( $N_z = 0$ ) das Rauschmaß den Wert 0 annimmt. Für  $N_{in}$  wählt man meist die kleinste nicht unterschreitbare Leistung bei Raumtemperatur, wie sie oben ermittelt wurde. Stellt man die Beziehung für das Rauschmaß (Formel 11) nach  $N_z$  um, ergibt sich:

$$N_z = 4,05 \cdot 10^{-21} \cdot \frac{B}{Hz} \cdot v \left( 10^{\frac{NF}{10}} - 1 \right) mW$$

Nun kann man für die Daten eines typischen Sat-ZF-Verstärkers mit  $NF = 5$  dB und  $v = 40$  (entsprechend 16 dB Leistungsverstärkung) für die Bandbreite eines Sat-Kanals einsetzen und erhält Formel 13:

$$\begin{aligned} N_z &= 4,05 \cdot 10^{-21} \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 40 \left( 10^{\frac{5}{10}} - 1 \right) mW \\ &= 0,0105 nW \end{aligned}$$

Wenn man sich vergegenwärtigt, dass ein typischer LNB mit 80 dB $\mu$ V Ausgangspegel (-28,75 dBm) und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 15 dB bezogen auf eine Bandbreite von 30 MHz mit -43,75 dBm (42,17 nW) rauscht, wird deutlich, dass die vom Verstärker hinzugefügten 0,0105 nW getrost vernachlässigt werden können.

Die gleiche Erkenntnis kann man aus der so genannten Friisschen Formel für die Gesamtzusatzrauschzahl einer Kettenschaltung aus  $n$  rauschenden Vierpolen gewinnen (Formel 14):

$$F_{z_{\text{Ges}}}} = F_{z_1} + \frac{F_{z_2}}{v_1} + \frac{F_{z_3}}{v_1 v_2} + \dots + \frac{F_{z_n}}{v_1 v_2 \dots v_{n-1}}$$

*Friissche Formel*

Ist dem LNB ein Verstärker nachgeschaltet, endet die Formel nach dem ersten Bruch. Das Zusatzrauschen des Verstärkers geht nur geteilt durch die hohe Verstärkung des LNBs ( $v_1$ ) in die Gesamtzusatzrauschzahl der Anordnung ein und spielt praktisch keine Rolle. Deshalb kann man auch das Rauschen der Eingangsstufe des Satellitentuners vernachlässigen. Dies ist der Grund, warum in einer Satellitenanlage das Rauschmaß des LNBs die absolut dominierende Rolle spielt. Hinweis: Wenn ein Verstärker in die Zuleitung von einem Multischalterausgang zur Teilnehmerdose eingeschleift wird (Inline-Verstärker), muss dieser in Rückwärtsrichtung die Gleichspannung und die 22-kHz-Signalfrequenzen führen.

### Nichtlinearitäten

Der ideale Verstärker hat eine lineare Kennlinie, d. h. die Ausgangsspannung

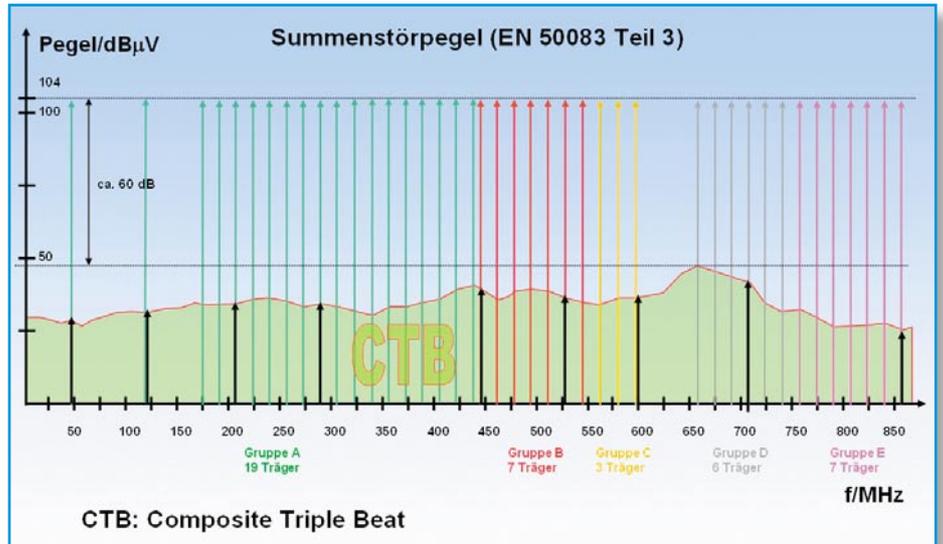
sieht genauso aus wie die Eingangsspannung, nur eben verstärkt. In der Praxis sind Verstärkerkennlinien aber keine Geraden, sondern haben in der mathematischen Darstellung neben dem linearen Term noch Terme höherer Ordnung. Die allgemeine Form der Kennliniengleichung ist in Formel 15 zu sehen:

$$y = ax + bx^2 + cx^3 + \dots$$

In Abbildung 2 ist  $a = 10$  (Verstärkung),  $b = -2$  und  $c = 2,5$ . Terme höherer Ordnung werden vernachlässigt. Die nichtlineare Kennlinie setzt sich also aus einem linearen, einem quadratischen und einem kubischen Term zusammen. Die beiden Letztgenannten sind für die so genannten CSO- und CTB-Störprodukte bei Vielträgeransteuerung zuständig (CSO: Composite Second Order, CTB: Composite Triple Beat). Man erkennt, dass mit zunehmender Aussteuerung, d. h. größerer Amplitude des Eingangssignals, die Störprodukte anwachsen und zwar quadratisch bzw. kubisch, wodurch sich ein 1-2-3-dB-Zusammenhang für Eingangssignal, CSO- und CTB-Störprodukte ergibt. Das heißt, für 1 dB mehr Eingangspegel nehmen die Störungen zweiter Ordnung (CSO) um 2 dB und die Störungen 3. Ordnung um 3 dB zu. Daraus folgen die „CSO-Faustregel: Bei einer Erhöhung des Eingangspegels um 1 dB steigt der CSO-Pegel um 2 dB, der CSO-Störabstand nimmt also um 1 dB ab“ und die „CTB-Faustregel: Bei einer Erhöhung des Eingangspegels um 1 dB steigt der CTB-Pegel um 3 dB, der CTB-Störabstand nimmt also um 2 dB ab“.

Richtig kompliziert wird es, wenn nicht nur ein Träger, sondern mehrere einen solchen realen Verstärker durchlaufen. Am Beispiel des quadratischen Terms der

**Bild 3:**  
Ermittlung des Pegelabstands zwischen dem Bildträger und dem größten Störhaufen



Kennliniengleichung kann man sehen, wie komplex der Term zweiter Ordnung bereits bei zwei Frequenzen im Eingangssignal wird (Formel 16):

$$y = (c_1 \cos x_1 + c_2 \cos x_2)^2$$

$$= \frac{1}{2}(c_1^2 + c_2^2) + \frac{1}{2}c_1^2 \cos 2x_1 + \frac{1}{2}c_2^2 \cos 2x_2$$

$$+ c_1 c_2 \cos(x_1 - x_2) + c_1 c_2 \cos(x_1 + x_2)$$

Hier entstehen also Schwingungen mit der doppelten Frequenz der Eingangsschwingungen sowie mit deren Summen- und Differenzfrequenz und ein Gleichanteil. Noch schlimmer wird es bei den Intermodulationsprodukten, die durch den



**Bild 4:** Dieser Bolide mit 8 Sat-ZF-Verstärkerzügen mit einer Bandbreite von 950 bis 2400 MHz und einem aktiven Zweig von 85 bis 860 MHz ist zudem noch rückkanalfähig. Wenn über seinen terrestrischen Eingang eine Verbindung zu einem interaktiven BK-Netz hergestellt wird, kann jeder Teilnehmer dieses neben den 11,6 GHz Sat-ZF-Bandbreite auch mit allen interaktiven Diensten nutzen (Telefonie, Internet, Video on Demand usw.). Er wird zwischen LNBs und dem ersten Multischalter eingefügt. Quelle WISI

Kennlinienterm 3. Ordnung hervorgerufen werden (Formel 17):

$$y = (c_1 \cos x_1 + c_2 \cos x_2)^3$$

$$= \left(\frac{3}{4}c_1^3 + \frac{3}{2}c_2^3\right) \cos 2x_1 + \left(\frac{3}{4}c_2^3 + \frac{3}{2}c_1^3\right) \cos 2x_2$$

$$+ \frac{3}{4}c_1^2 c_2 (\cos(2x_1 - x_2) + \cos(2x_1 + x_2)) \dots$$

$$\dots + \frac{3}{4}c_1 c_2^2 (\cos(2x_2 - x_1) + \cos(2x_2 + x_1))$$

$$+ \frac{1}{4}c_1^3 \cos 3x_1 + \frac{1}{4}c_2^3 \cos 3x_2$$

Man kann sich gut vorstellen, wie unübersichtlich die Angelegenheit bei 3 und mehr Trägerfrequenzen wird. Hier ist man mit analytischen Berechnungsmethoden am Ende und auf Vielträgermessanordnungen angewiesen.

Ohne auf die Messvorschriften des Intermodulationsabstandes nach DIN für IMA 2 und IMA 3 (Intermodulationsabstand 2. und 3. Ordnung), EN 50083 Teil 3 und CENELEC für CSO und CTB genauer einzugehen, kann man doch einige zusammenfassende Aussagen treffen. Die klassischen Messverfahren benutzen zwei oder drei Träger. Werden jedoch sehr viel mehr Träger übertragen, können auf eine einzelne Frequenz tausende von Störprodukten entfallen. Wegen dieser Häufung spricht man von den Composite-Störungen CSO und CTB. Es ist daher sinnvoll, den Verstärker auch unter diesen realistischen Bedingungen zu messen. Viele Hersteller geben immer noch die alten Werte an, die zahlenmäßig ja besser aussehen. Deshalb sollte man den Pegelangaben nur trauen, wenn man das zugrunde liegende Messverfahren kennt. Um eine Aussage über die Störung eines bestimmten Kanals



**Bild 5:** Der Sat-ZF-Verstärker wird in Leitungen mit hoher Dämpfung zwischen Multischalter und Teilnehmer eingefügt. Die Speisung kommt vom Receiver und die Steuersignale werden in Rückwärtsrichtung an den Multischalter weitergeleitet. Quelle Polytron

treffen zu können, muss der Pegelabstand zwischen dem Bildträger und dem größten Störhaufen innerhalb der Kanalbreite ermittelt werden (Abbildung 3). Umfang und Verteilung der Störprodukte hängen von den Intermodulationseigenschaften des Verstärkers und der Frequenzlage der Träger ab. Für die Vergleichbarkeit von Verstärkerdaten wird meist das 42-Kanal-CENELEC-Raster (Committee for Electrotechnical Standardization) verwendet. Auch die restlose Belegung des Bandes mit Trägern im Kanalaraster ist sinnvoll und wird in den USA praktiziert.

Die Messmethoden wurden eigentlich für Verstärker im Frequenzbereich bis 860 MHz entwickelt, lassen sich aber natürlich auch auf den Sat-ZF-Bereich übertragen.

**Fazit:** Verstärker auf keinen Fall zu stark aussteuern, weil dies zu komplexen gegenseitigen Beeinflussungen der Eingangssignale untereinander führt. ELV