TESAT SPACECOM

PIONEERING WITH PASSION

ReSAT (Repeater Simulation and Analysis Tool)

Auswirkung linearer und nichtlinearer Verzerrungen auf Kanäle mit codierter Modulation und Frequenzmultiplexing

Prof. Dr. Bernd Friedrichs (Tesat)

Simon Mauch (Tesat)

Wolfgang Steinert (ST²C)

Dr. Philipp Wertz (Tesat)

PROPRIETARY INFORMATION

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG reserves all rights including industrial property rights, and all rights of disposal such as copying and passing to third parties

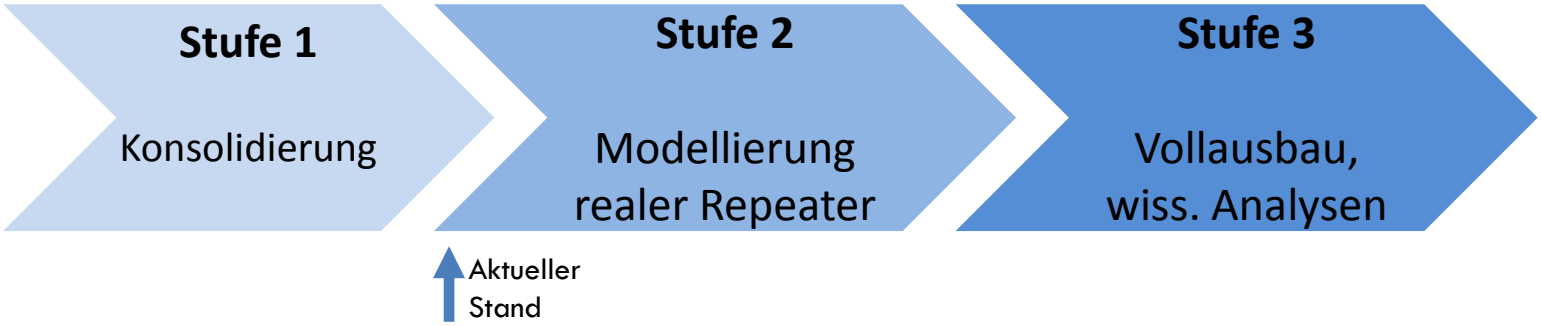
Ziel und Projektorganisation

- **Ziel:** Ausbau der Systemfähigkeit bei Auslegungen von Nutzlasten

- **Zuwendungsgeber**
  - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
  - Laufzeit 1.7.2011 – 31.1.2013, Förderkennzeichen 50 YB 1116

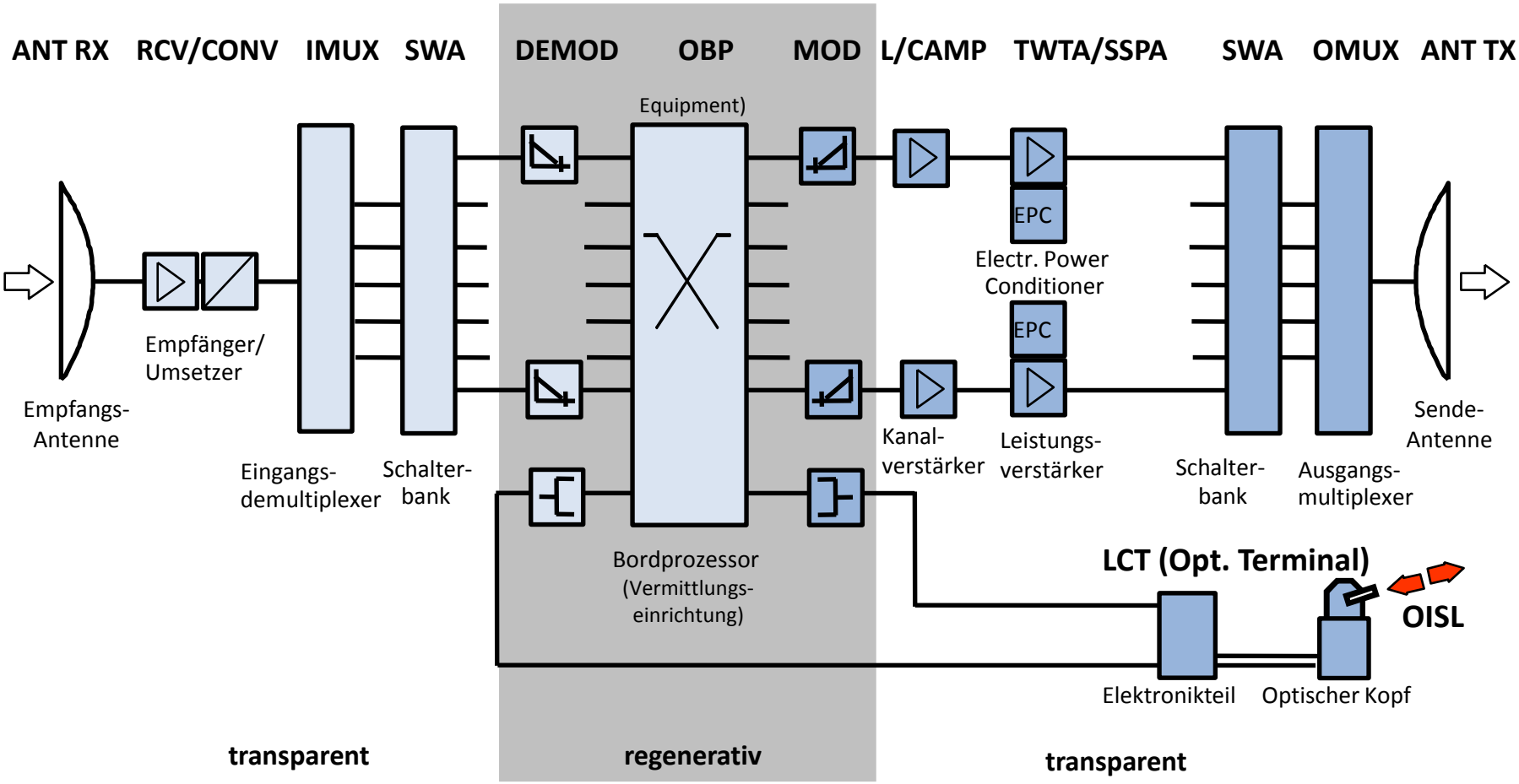
- **Unterauftragnehmer**
  - ST^{2}C GmbH

- **Gliederung in Stufen (Releases)**



©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

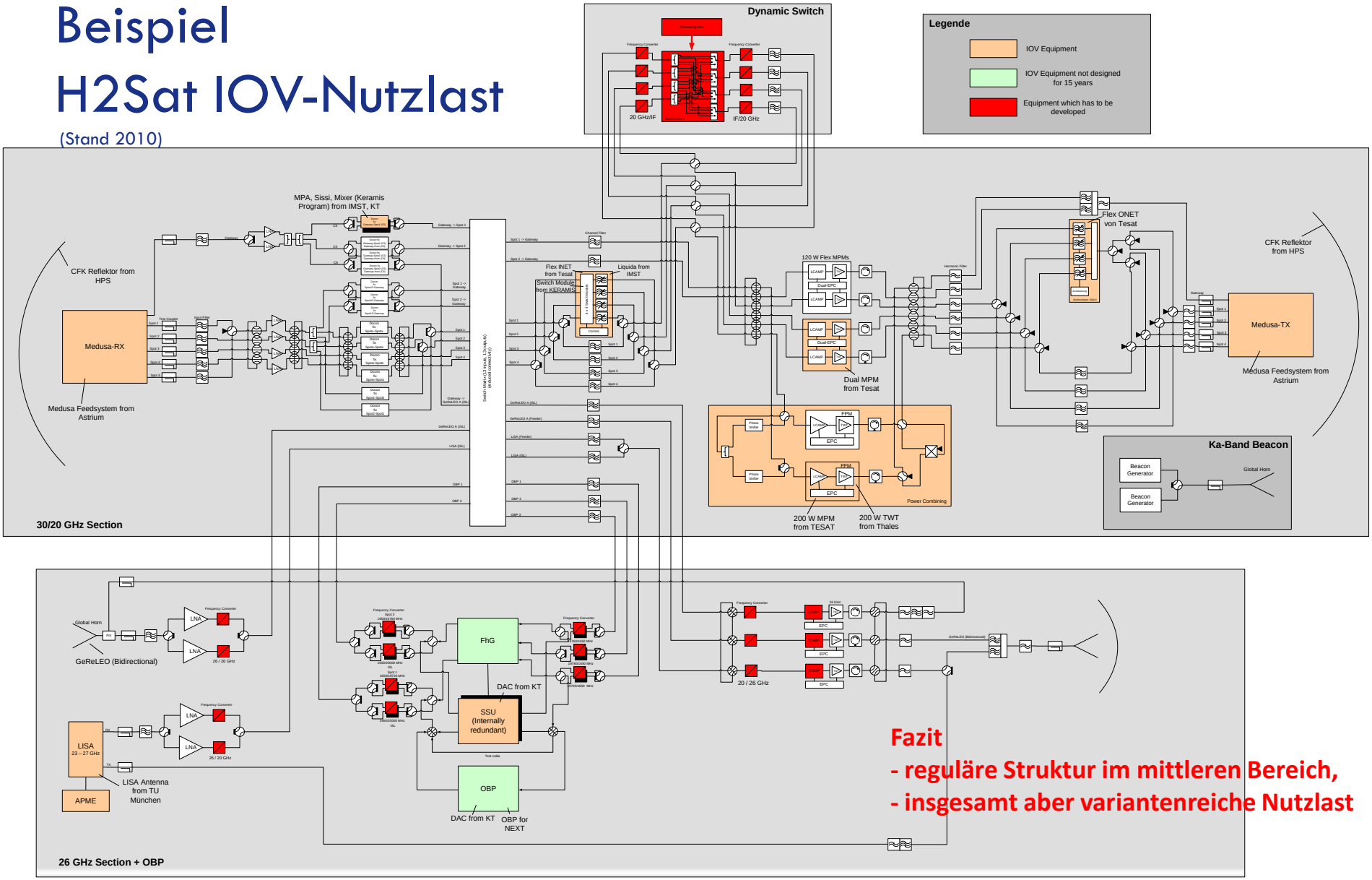
Allgemeine Architektur einer Kommunikations-Nutzlast



 ©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Beispiel
H2Sat IOV-Nutzlast

(Stand 2010)



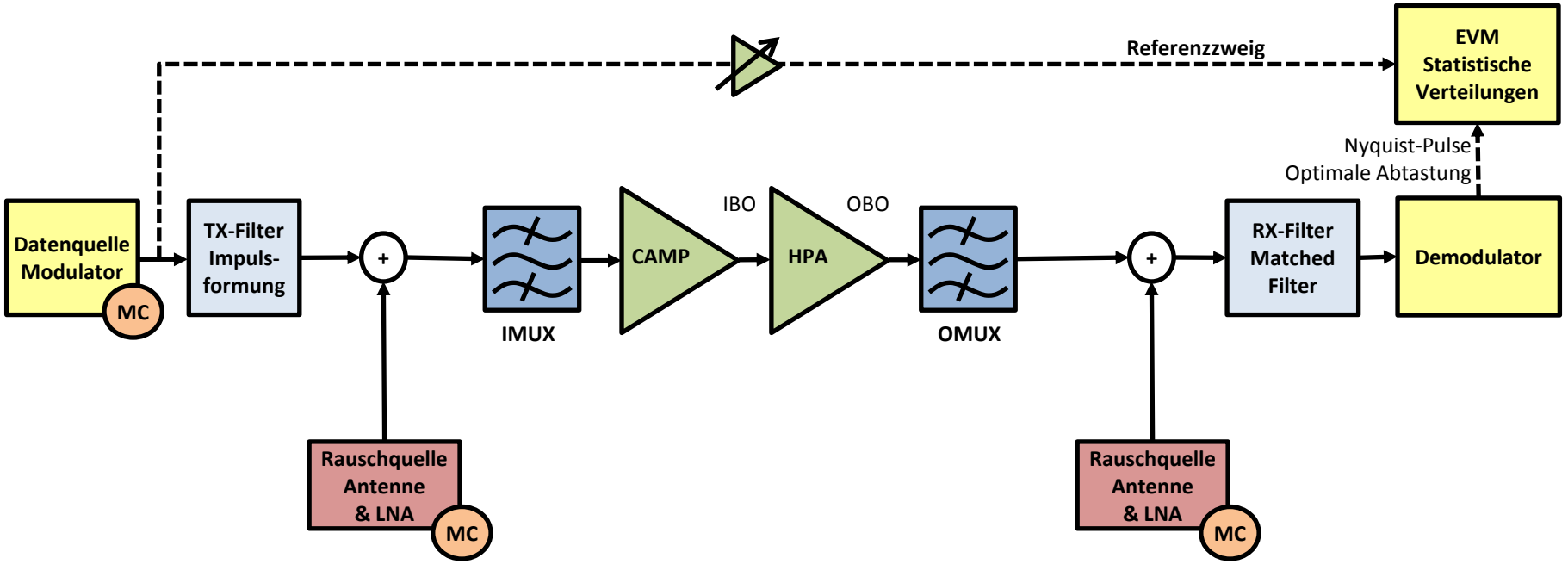
Fazit

- reguläre Struktur im mittleren Bereich,

- insgesamt aber variantenreiche Nutzlast

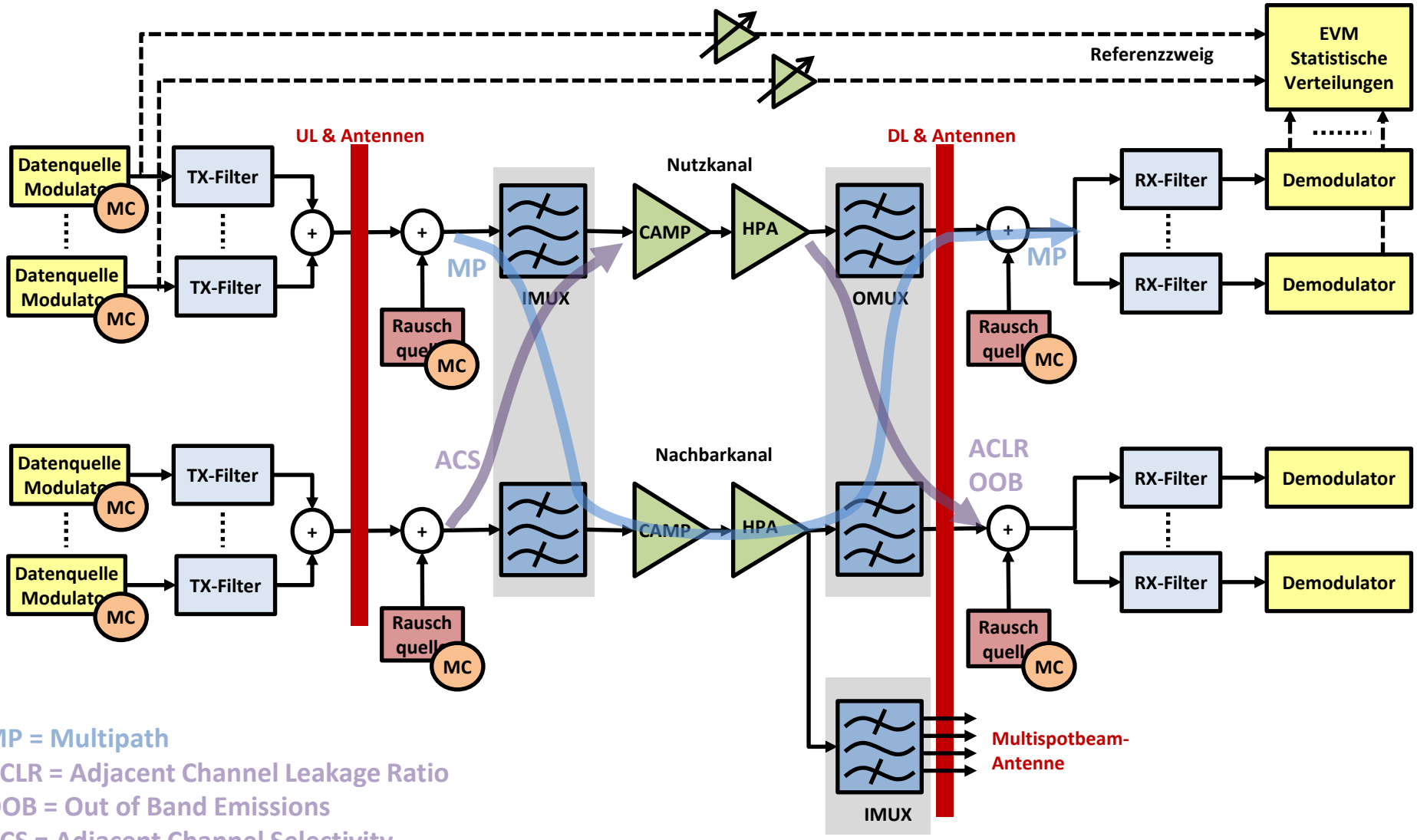
©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

ReSAT-Konfiguration (Basis)



©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

ReSAT-Konfiguration (Erweitert)



MP = Multipath
ACLR = Adjacent Channel Leakage Ratio
OOB = Out of Band Emissions
ACS = Adjacent Channel Selectivity

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Wesentliche Einflussgrößen in Repeatern

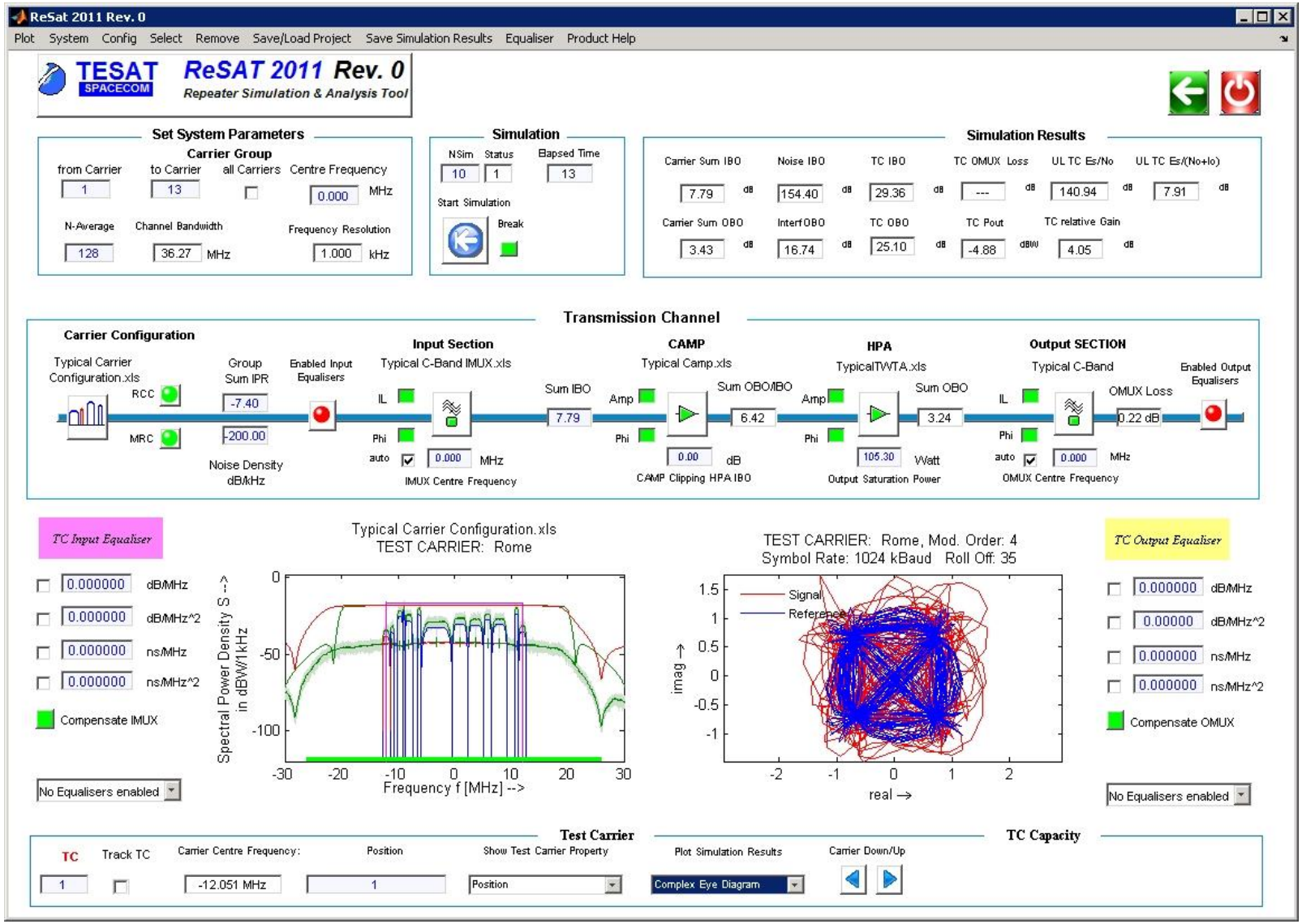
- **Realistische Dimensionierung**
  - Dimensionierung von Repeatern unter realistischen Randbedingungen
  - Vermeidung Over- wie Under-Engineering

- **Beispiele wichtiger Einflussgrößen**
  - Lineare Verzerrungen, insbesondere bei Kanalfiltern wie IMUX, OMUX
  - Nichtlineare Verzerrungen, insbesondere bei CAMP und HPA, auch kaskadierte Intermods
  - Linearisierung (Sender- oder Transponder-seitig)
  - Multipath und Reflektionen, einschließlich statistischer Analysen (Phase)
  - Breitband-Komponenten, z.B. LNA, Docon (schwach nichtlinear), Filter (linear)
  - Frequenzumsetzer: Phasenrauschen, Mischprodukte (Ein- und Ausgangsfrequenz nicht gemeinsam repräsentiert weil simulationstechnisch zu aufwendig)
  - Temperatur-Effekte
  - Komplette Transponderzüge, eingeschränkt auch Antennen (ohne Beamforming)
  - Verstärker- und OMUX-Techniken hinsichtlich Multispot-Antennen
  - Komplette Repeater via separater Transponderzüge (keine Schaltfunktionalität)
  - Bestimmung von EVM-Verteilungen zur Analyse hochstufiger Modulationsverfahren

- **Grundprinzipien**
  - Messung via Mehrträgersignal: flexibles FDM-Signal pro Kanal
  - Flexibler Tradeoff: Bandbreite – Frequenzauflösung – FFT – Zeitdauer Musterfunktionen

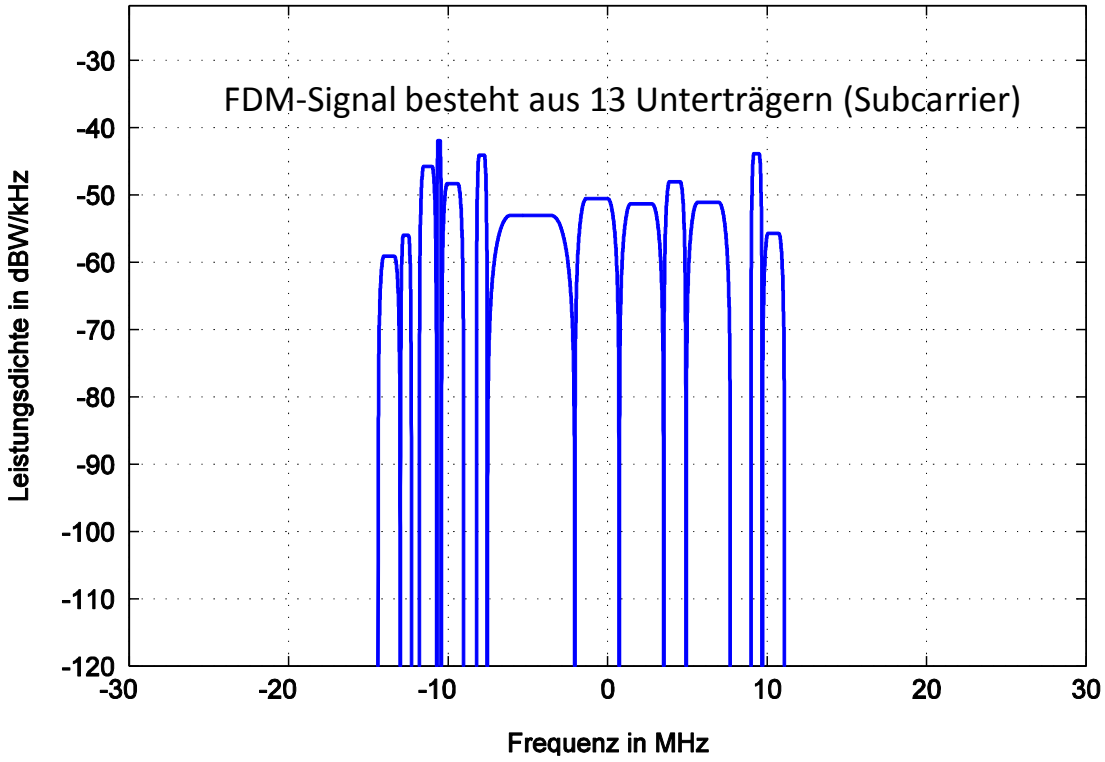
©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

ReSAT GUI (gemäß Stufe 1)



 ©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Beispiel Kanalbelegung mit FDM-Signal

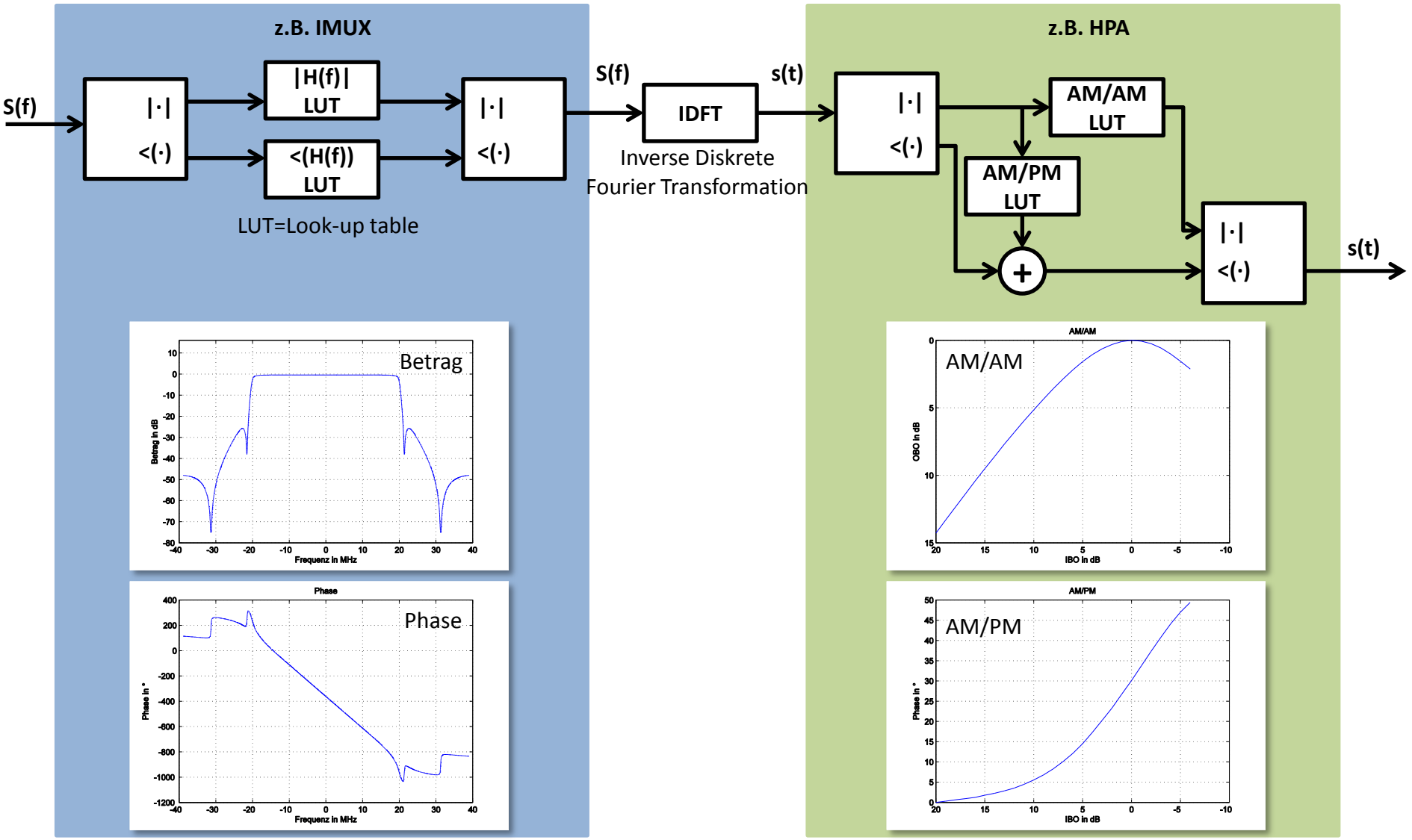


- **Jeder Subcarrier ist individuell konfigurierbar**
  - Modulationsverfahren (PSK, APSK, CW, etc)
  - Breite (Symbolrate)
  - Schutzabstand (Guardband)
  - Impulsformung (roll-off)
  - Leistungsdichte
  - Position innerhalb der Trägergruppe
- **Jeder Subcarrier wird im Simulator individuell gemessen mit Auswertung der Degradation**
  - Breite oder schmale Subcarrier
  - Position in der Mitte oder am Rand des Kanals
- **Die spezielle Belegung von Transponder-Kanälen im Betrieb ist oftmals nicht absehbar**

Beachte: Subcarrier eines FDM Signals sind hier als vollständig unabhängig zu verstehen und nicht mit OFDM-Subcarriern zu verwechseln

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

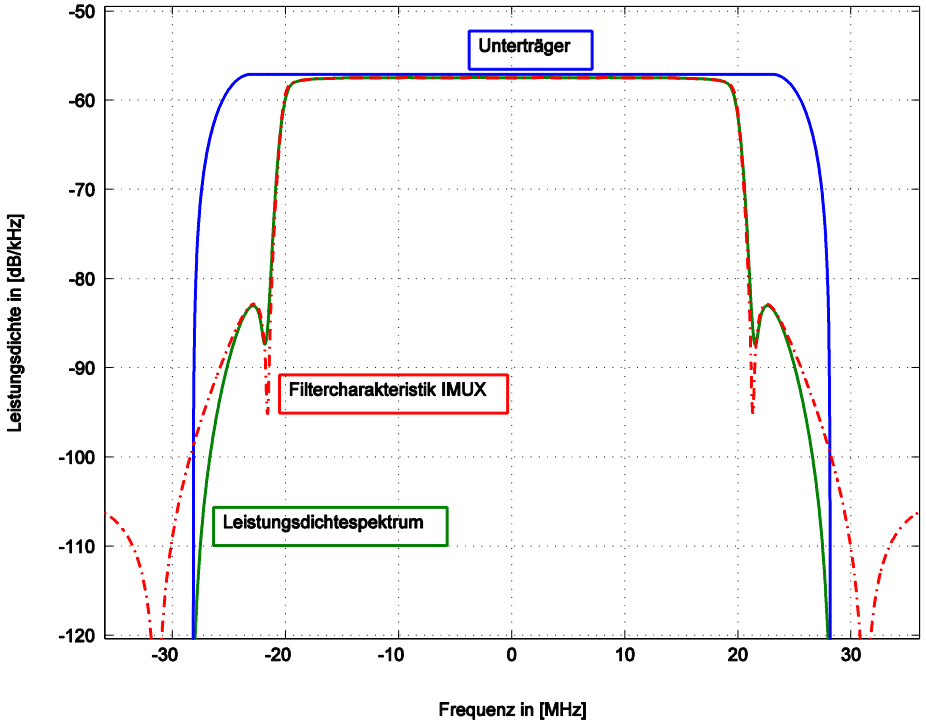
Beispiel eines Frequenz-Zeit Übergangs

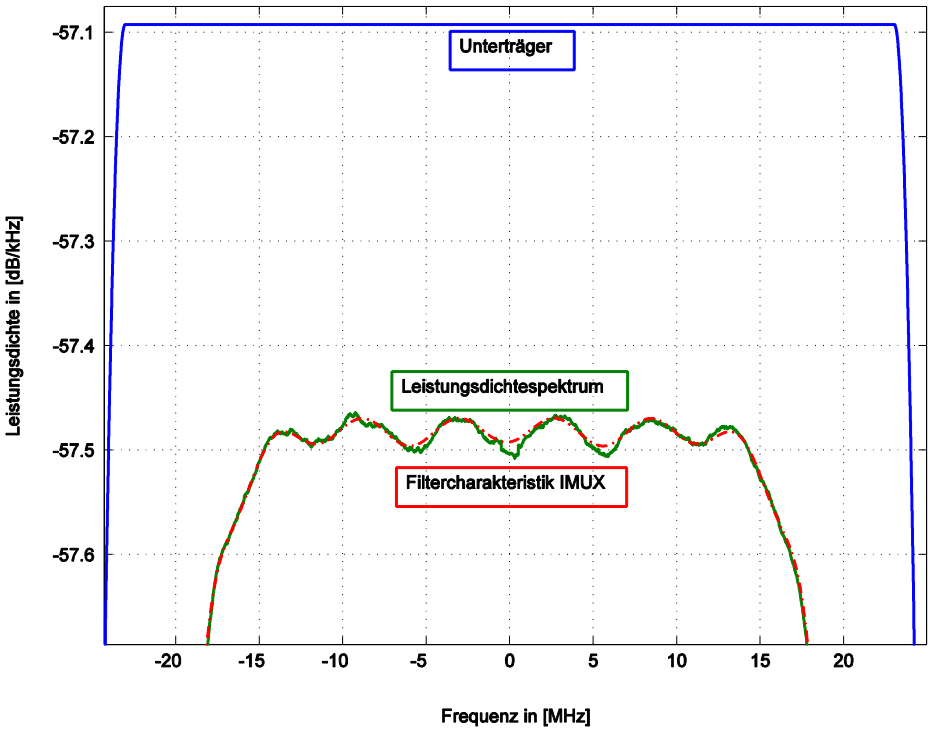


 ©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Spektrum gemittelt über unabhängige Simulationsläufe

- Mehrfache MC-Simulation mit gleichen Eingangsparametern aber neuen Zufallswerten
- Leistungsdichte durch Mittelung von Periodogrammen (Bartlett-Metode): Minderung der Varianz
- Fehler < 0.01dB möglich





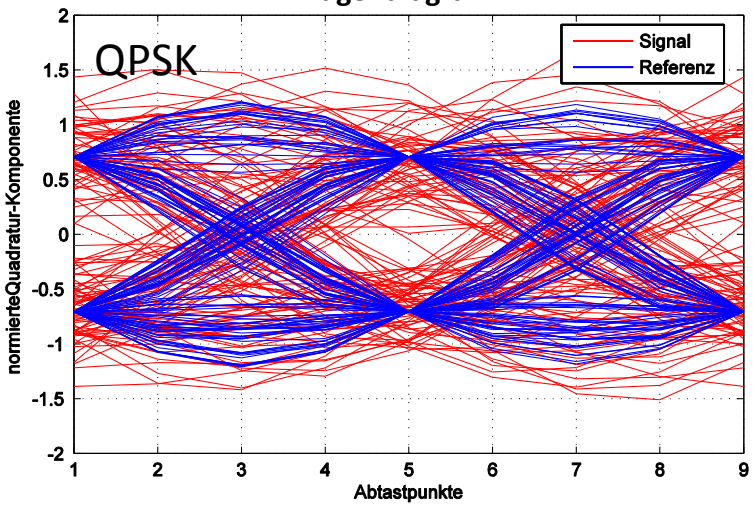
Beispiel: Leistungsdichtespektrum für breitbandigen Einzelträger und IMUX (rechts vergrößert)

„Messung (grün) ist das Produkt aus Signal (blau) und Filter (rot)“

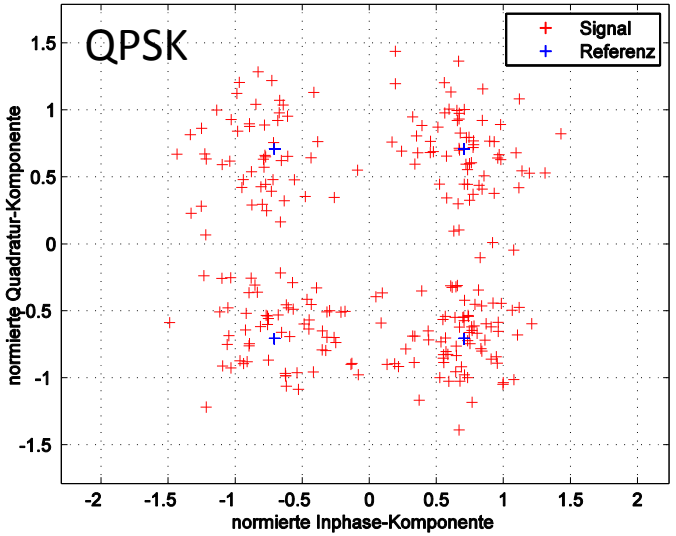
©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Augen- und Scatterdiagramme (QPSK, 32APSK)

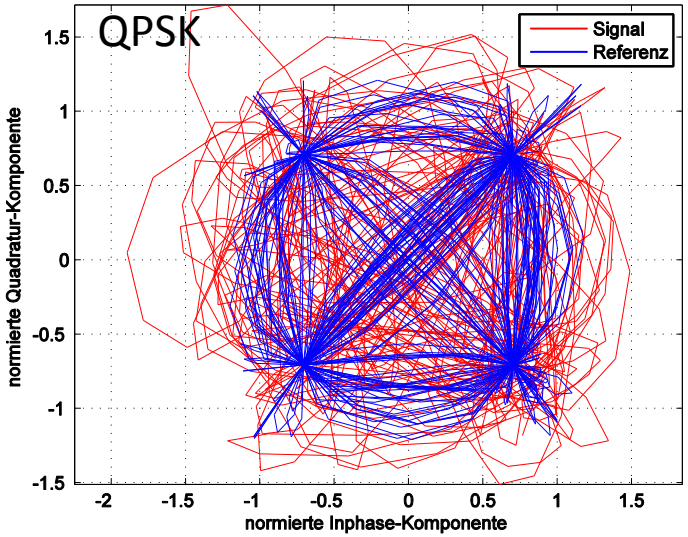
Augendiagramm

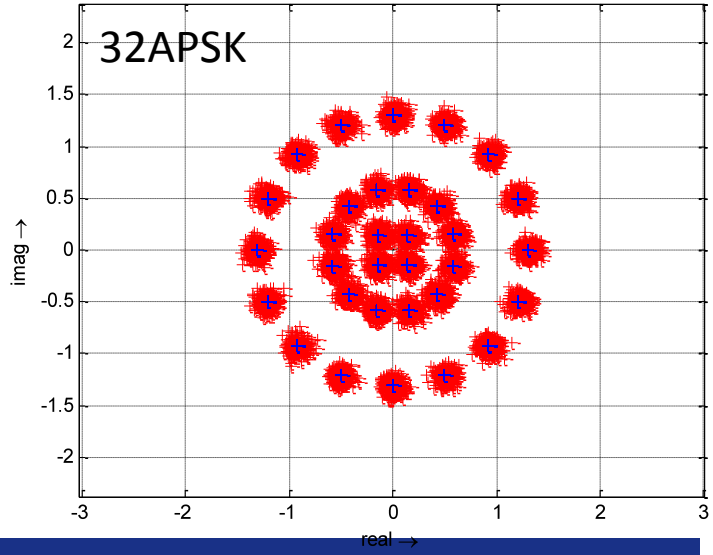


Streuung um die Idealwerte (optimaler Abtastzeitpunkt)



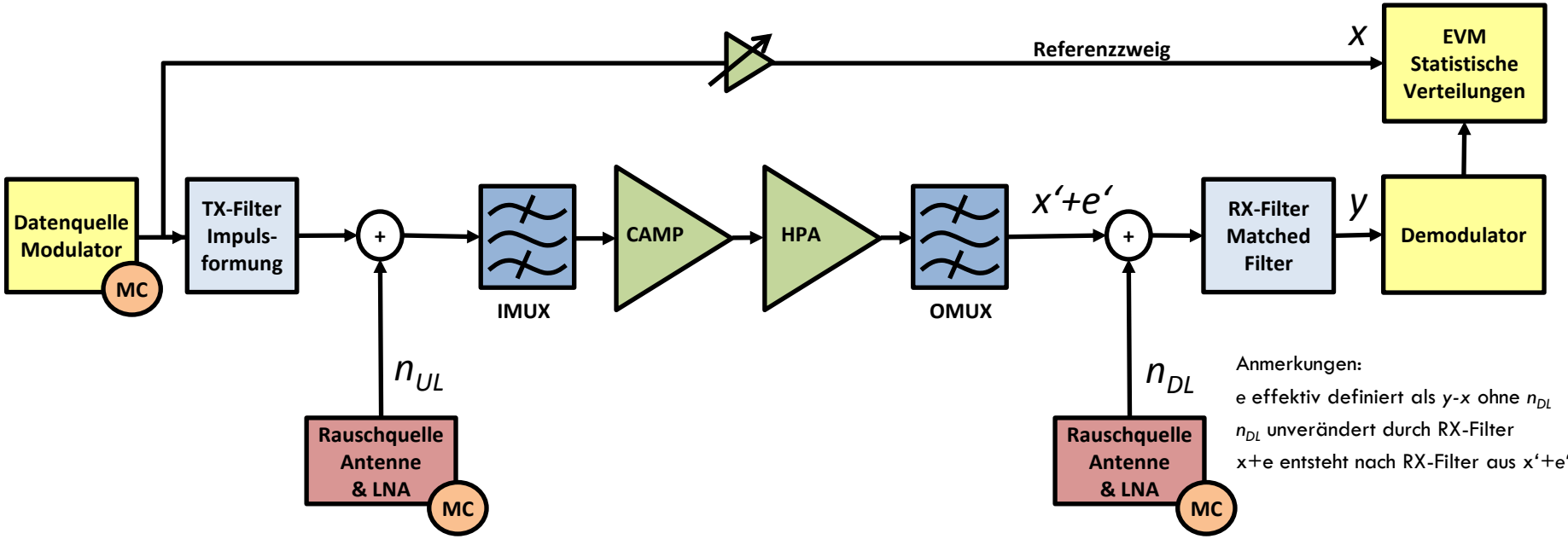
Trajektorie





©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

EVM (Error Vector Magnitude) – Definition



$$y = x + e + n_{DL} \quad \text{(per Subcarrier)}$$

- y: Empfangssignal
- x: Ideales Signal
- e: Degradation
- n_{DL}: thermisches Rauschen

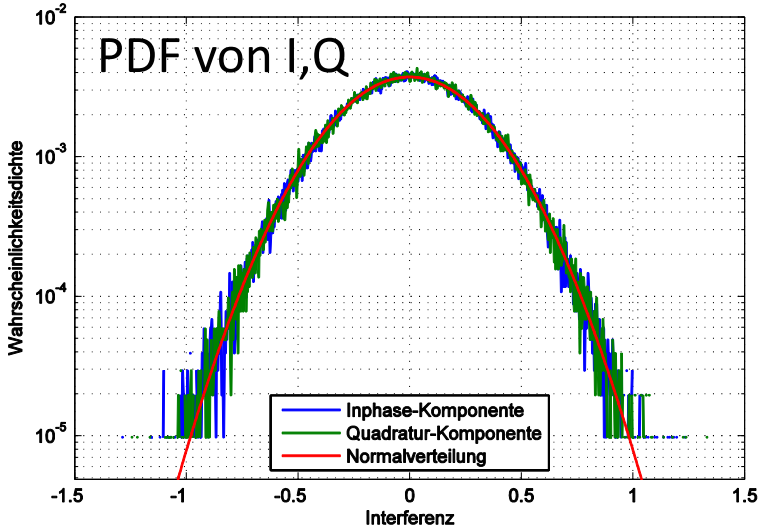
$$SNR = \frac{E(x^2)}{E(n_{DL}^2)}$$

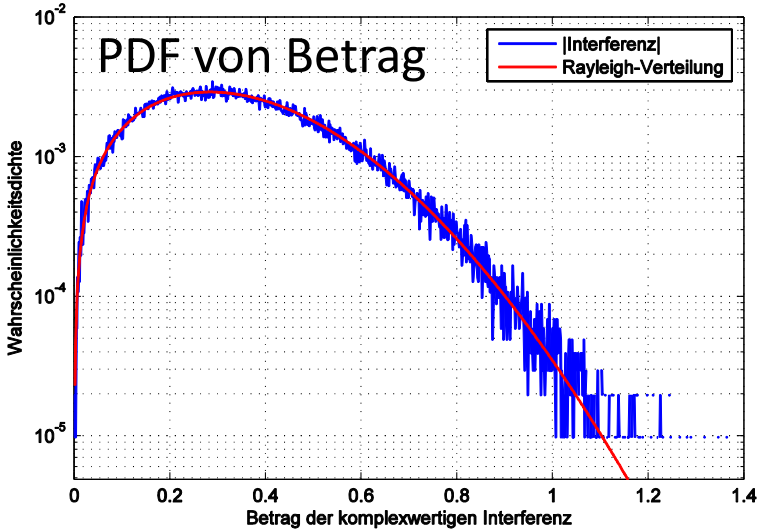
$$SNR_{total} = \frac{E(x^2)}{E(e^2) + E(n_{DL}^2)}$$

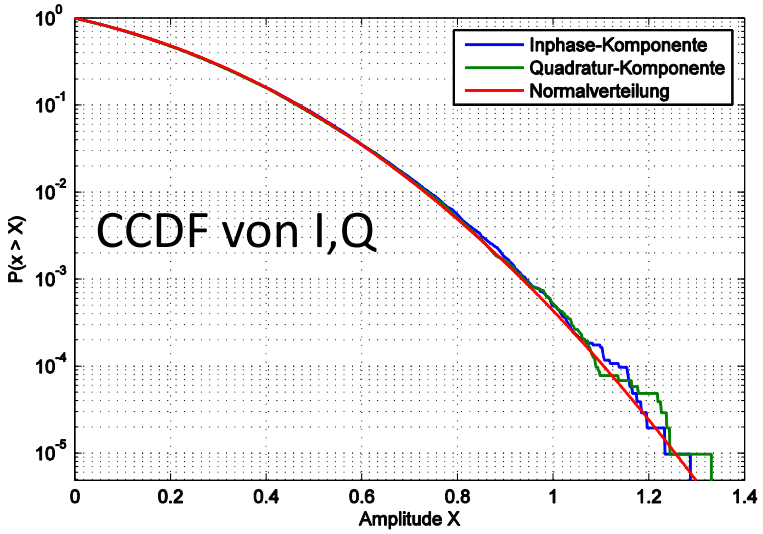
$$EVM\,\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{E(e^2)}{E(x^2)}}$$

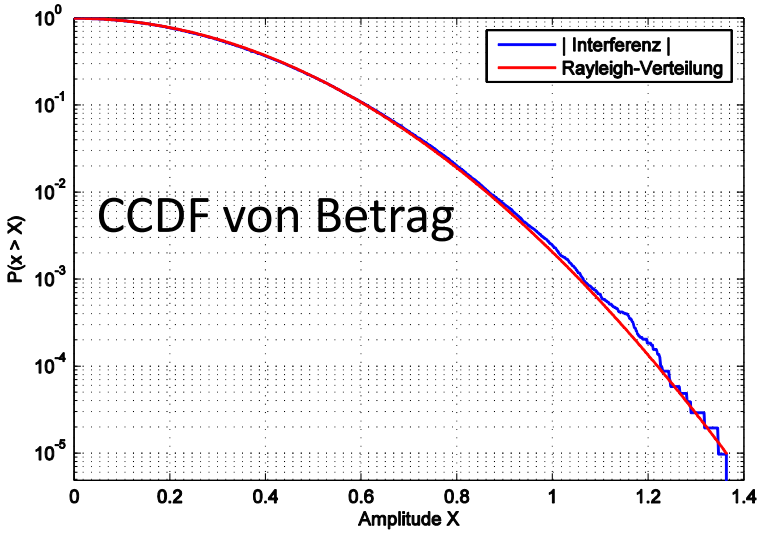
©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

EVM – Gemessene Verteilungen sind nahezu Gaußisch



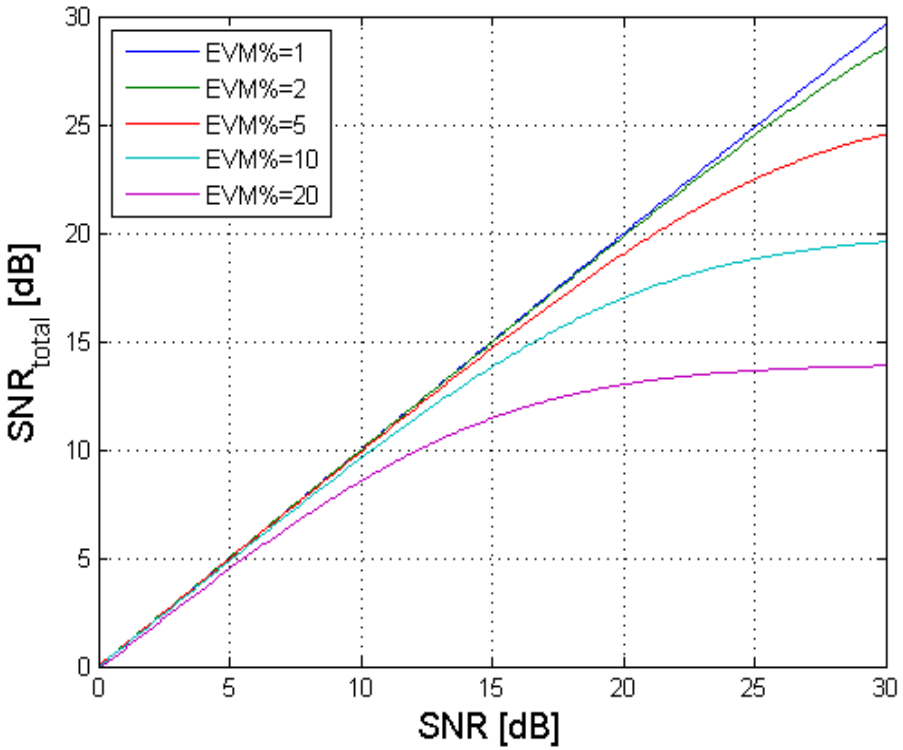




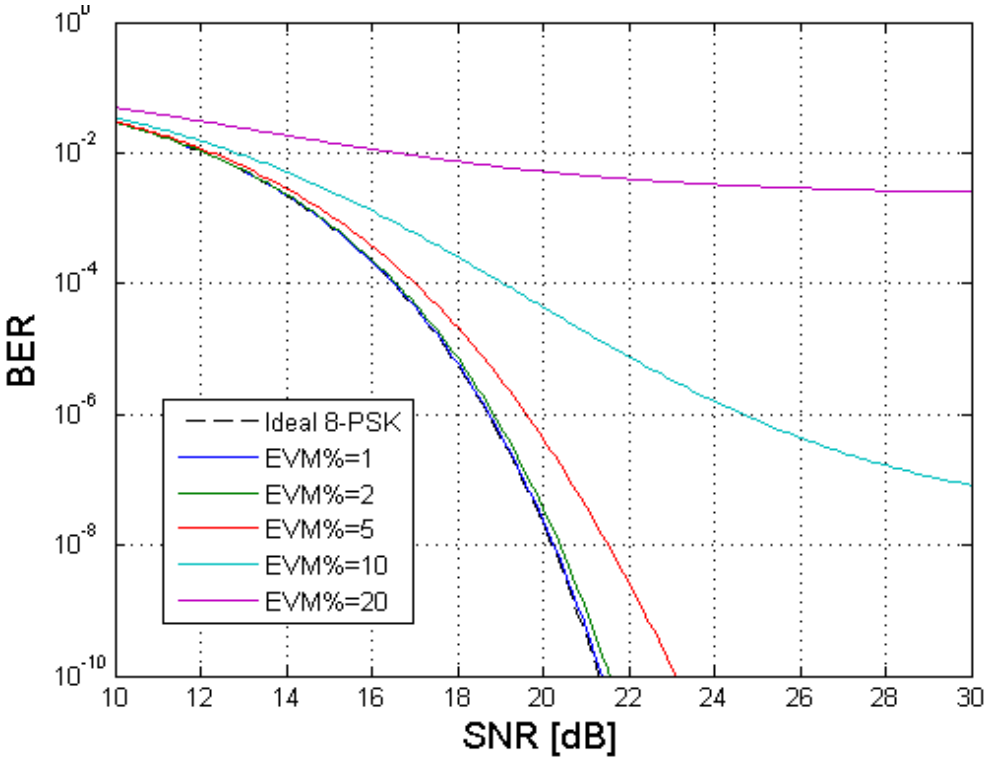


©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

EVM – Auswirkungen bei idealisierter Gauß-Verteilung



SNR_{total} über $SNR_{Rauschen}$
für spezielle EVM-Werte



BER über $SNR_{Rauschen}$
für spezielle EVM-Werte bei 8-PSK

Beachte: Bei codierter Modulation ohne perfektes Interleaving ist die Statistik der Störungen relevant. Die beiden Rauschsignale n_{UL} und n_{DL} sind weiß, die Degradation e aber nicht unbedingt (denn lineare Filter erzeugen Gedächtnis)

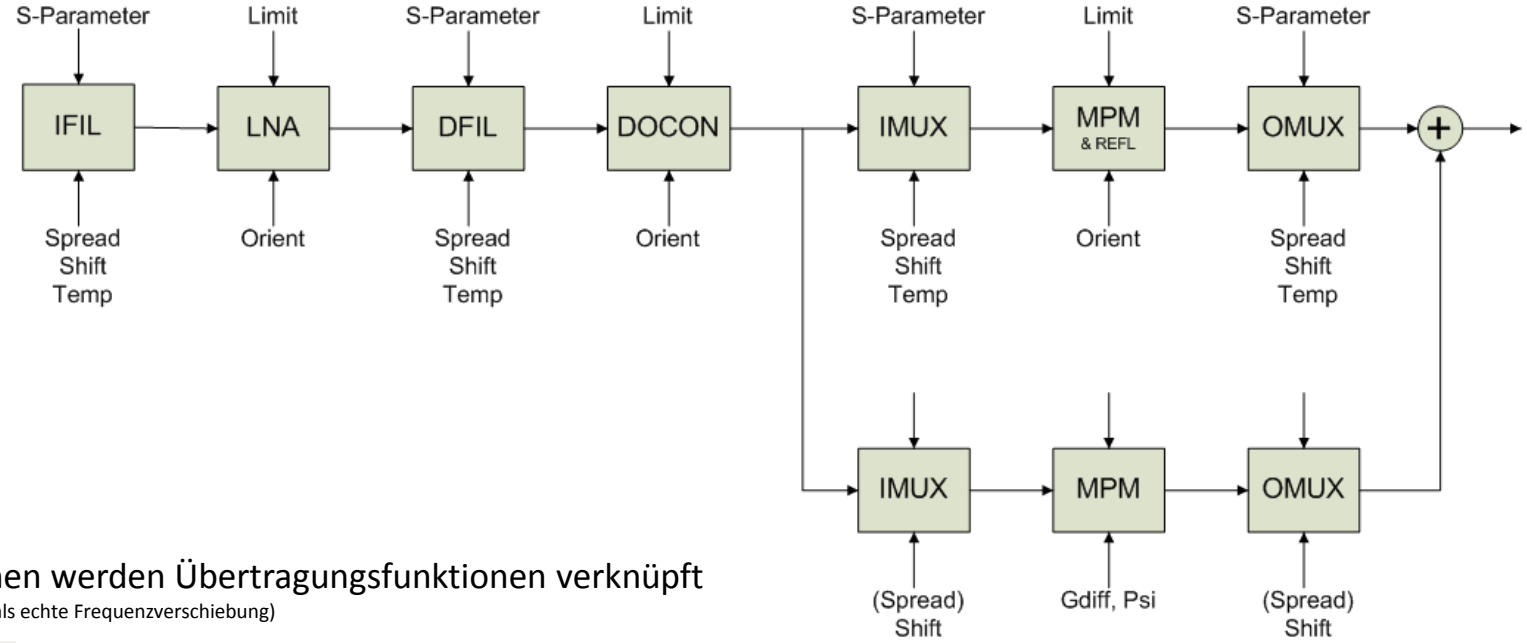
©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Analyse- vs. Simulations-Ansatz

	Analyse	Simulation
Operiert in	Frequenzbereich	Zeit- und Frequenzbereich
Methodik	Verknüpfung von Übertragungsfunktionen nichtlineare Elemente bleiben unberücksichtigt	Zufallsgeneratoren (Monte-Carlo) für - Datenquelle - thermisches Rauschen Berücksichtigung - linearer Elemente im Frequenzbereich - nichtlinearer Elemente via AM/AM und AM/PM
Ermittlung von Spektren	Analytische Berechnung	Mittelung über Leistungsdichte-spektren von Musterfunktionen
Scatterdiagramme, EVM	nicht möglich	gut geeignet
Statistische Analysen, z.B. worst-case Kombinationen	sehr gut möglich (nur lineare Elemente)	möglich
Rechenzeit	gering	exponentiell ansteigend mit Genauigkeitsanforderungen und Bandbreiten

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

Analyse-Ansatz (Schwerpunkt Multipath)



Im wesentlichen werden Übertragungsfunktionen verknüpft
(Docon als Filter, nicht als echte Frequenzverschiebung)

$$H_{InputSec}(f) = H_{IFIL}(f) \cdot H_{LNA}(f) \cdot H_{DFIL}(f) \cdot H_{DOCON}(f) \cdot H_{IMUX}(f)$$

$$H_{wanted}(f) = H_{IMUX}(f) \cdot H_{MPM}(f) \cdot H_{OMUX}(f)$$

$$H_{unwanted}(f) = (H_{wanted}(f - f_{chsep}) + H_{wanted}(f + f_{chsep})) \cdot G_{diff} \cdot \exp(j \cdot \psi)$$

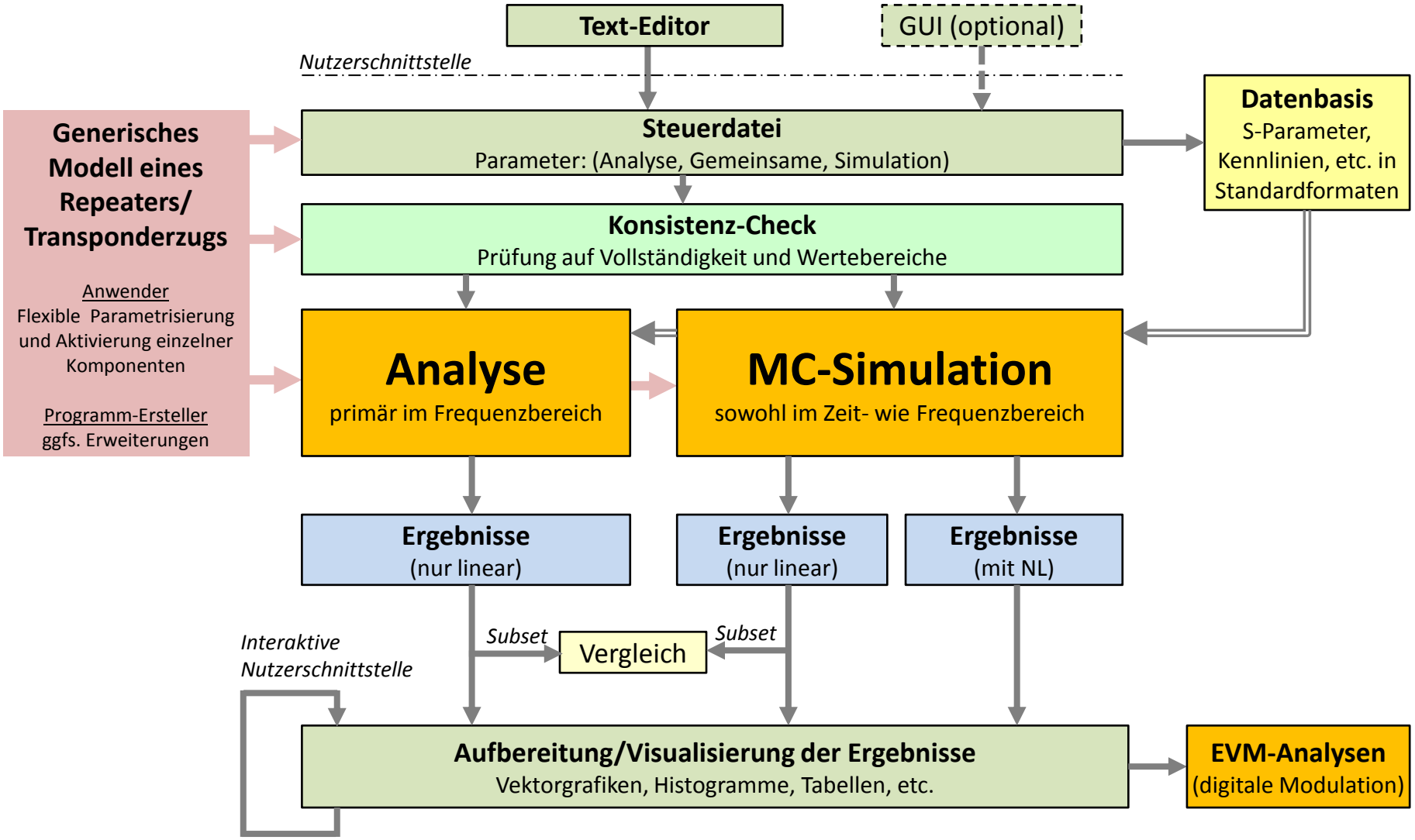
$$H_{MP}(f) = 1 + \frac{H_{unwanted}(f)}{H_{wanted}(f)} \quad \rightarrow \quad H_{wanted}(f) \cdot H_{MP}(f) = H_{wanted}(f) + H_{unwanted}(f)$$

$$\begin{aligned} H_{Total}(f) &= H_{IFIL}(f) \cdot H_{LNA}(f) \cdot H_{DFIL}(f) \cdot H_{DOCON}(f) \cdot (H_{wanted}(f) + H_{unwanted}(f)) \\ &= H_{IFIL}(f) \cdot H_{LNA}(f) \cdot H_{DFIL}(f) \cdot H_{DOCON}(f) \cdot H_{IMUX}(f) \cdot H_{MPM}(f) \cdot H_{OMUX}(f) \cdot H_{MP}(f) \\ &= H_{InputSec}(f) \cdot H_{MPM}(f) \cdot H_{OMUX}(f) \cdot H_{MP}(f) \end{aligned}$$

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

ReSAT – Vorgehensmodell:

Analyse & Simulation kombiniert
Generisches Modell Repeater
Steuerdatei für den Kern, Abtrennung sekundärer Funktionen



 ©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012

ReSAT vs. andere Werkzeuge

- **Analysewerkzeuge für lineare Komponenten**
  - lineare Effekte: Multipath, Reflexionen,
  - z.B. Tesat Werkzeuge in **MATLAB** und **Excel**
- **Simulationswerkzeuge für DL-Subsysteme (hochdatenratige Modulatoren)**
  - Modulation und Codierung mit Nichtlinearitäten,
  - z.B. Tesat Werkzeuge in **Simulink und C++**
- **Linkbudget-Rechner**
  - z.B. **Satmaster**, Pegelpläne, Boden-zu-Boden, nicht nur Transponderzug
- **Simulatoren auf Repeaterebene**
  - z.B. **SATRIS**, jedoch Fokus auf max. 3 Träger, Analysewerkzeuge außer SER nicht bekannt)
- **Universalwerkzeuge**
  - z.B. **Space-Engineering PST (Payload Simulation Tool)**, einschl. Repeater, Antennen, Ausleuchtung, Kanalcodierung, jedoch limitierte Flexibilität und Doku
- **Simulatoren auf Schaltungsebene**
  - z.B. **ADS** (Fokus auf Netzelemente, wenig geeignet für komplette Repeater)

⇨ **ReSAT: Maßgeschneidert als „Repeater Simulation and Analysis Tool“**
Matlab-Quellcode unter eigener Kontrolle

©Tesat-Spacecom GmbH & Co.KG 2012