



Untersuchungen zur Auslegung von Linearisierungssystemen mit digitaler Vorverzerrung



von
Eberhard Gamm



- Aufgabe
- Stand der Technik
- Fragestellungen
- Signale und Verstärker
- Linearisierungssystem
- Demonstrator
- Messergebnisse
- Zusammenfassung



Aufgabe

- Frequenz-Knappheit durch Einführung neuer Rundfunk- und Mobilkommunikationssysteme
erfordert
- Einsatz von komplexeren Modulationsverfahren mit Amplituden- und Phasenmodulation sowie rauschartigen Signalen
erfordert
- Verwendung linearer Verstärker zur Vermeidung von Nachbarkanalstörungen



Aufgabe - Systeme

System	1. Generation	2. Generation	3. Generation
Rundfunk	AM-Rundfunk AM / analog	FM-Rundfunk FM / analog	DAB OFDM / digital
Mobilkommunikation	FM (C-Netz) FM / analog	GSM (D/E-Netz) GMSK / digital	UMTS W-CDMA / digital

$$x_{HF}(t) = a(t) \cos(\omega_{HF} t + \varphi_0)$$

$$\underline{x}(t) = a(t) e^{j\varphi_0}$$

$$x_{HF}(t) = a_0 \cos(\omega_{HF} t + \varphi(t))$$

$$\underline{x}(t) = a_0 e^{j\varphi(t)}$$

$$x_{HF}(t) = \sum_{m=0}^M a_m(t) \cos((\omega_{HF} + \omega_m)t + \varphi_m(t))$$

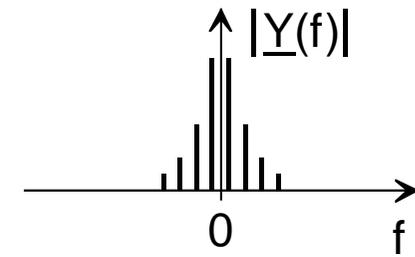
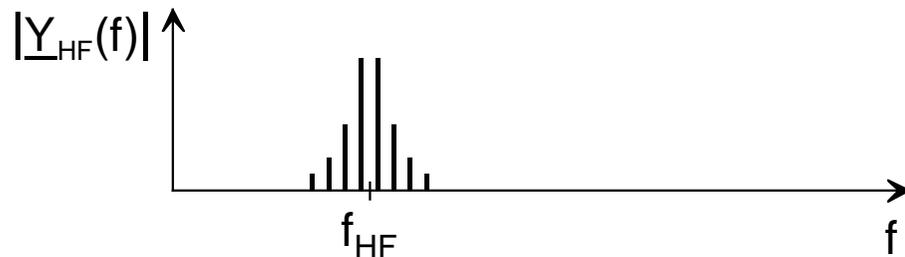
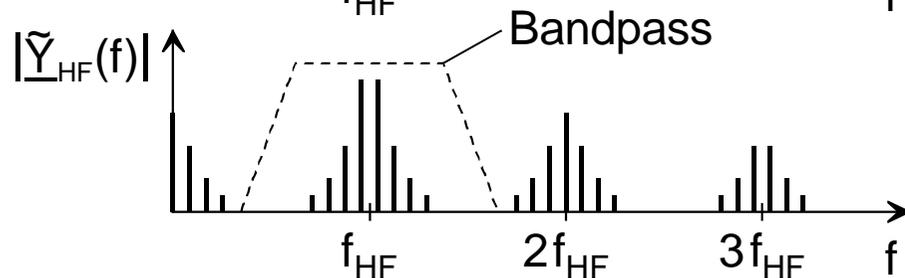
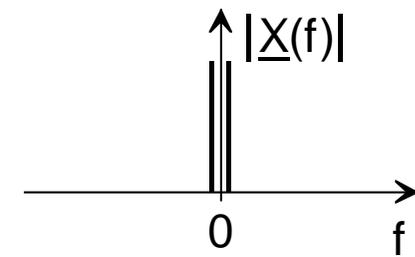
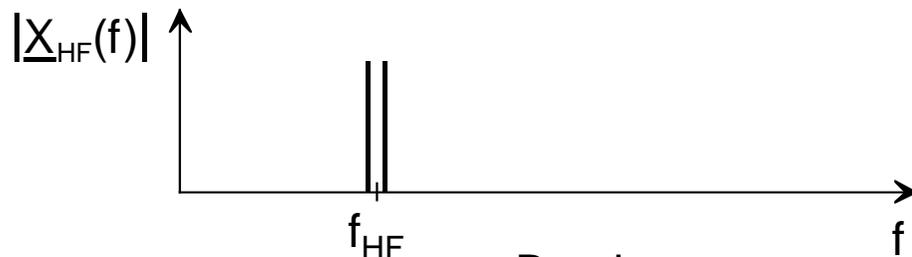
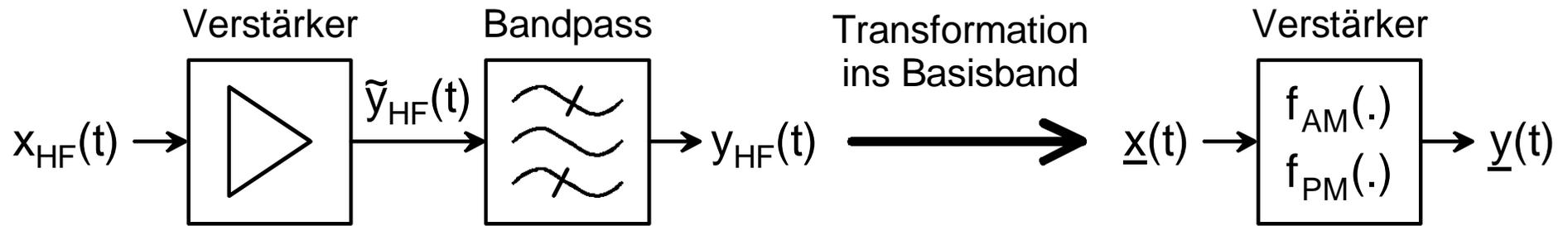
$$\underline{x}(t) = \sum_{m=0}^M a_m(t) e^{j\varphi_m(t)} e^{j\omega_m t} = a(t) e^{j\varphi(t)}$$

$$x_{HF}(t) = \sum_{n=0}^N a_n(t) \cos(\omega_{HF} t + \varphi_n(t))$$

$$\underline{x}(t) = \sum_{n=0}^N a_n(t) e^{j\varphi_n(t)} = a(t) e^{j\varphi(t)}$$



Aufgabe - Verstärker





Aufgabe - Verstärker

- Übertragungskennlinie \underline{f} im Basisband
 - AM/AM-Kennlinie f_{AM}
 - AM/PM-Kennlinie f_{PM}

$$\underline{y} = \underline{f}(\underline{x}) = f_{AM}(|\underline{x}|) e^{j(f_{PM}(|\underline{x}|) + \arg\{\underline{x}\})} = \sum_{m=0}^{\infty} c_{2m+1} |\underline{x}|^{2m} \underline{x}$$

- Verstärkungskennlinie \underline{v}

$$\underline{v}(|\underline{x}|) = \frac{\underline{y}}{\underline{x}} = \frac{f(\underline{x})}{\underline{x}} = \frac{f_{AM}(|\underline{x}|)}{|\underline{x}|} e^{j f_{PM}(|\underline{x}|)} = \sum_{m=0}^{\infty} c_{2m+1} |\underline{x}|^{2m}$$

- $|\underline{x}| = \text{const.} \Rightarrow \underline{v} = \text{const.} \Rightarrow$ keine Verzerrungen



Aufgabe - Verstärker

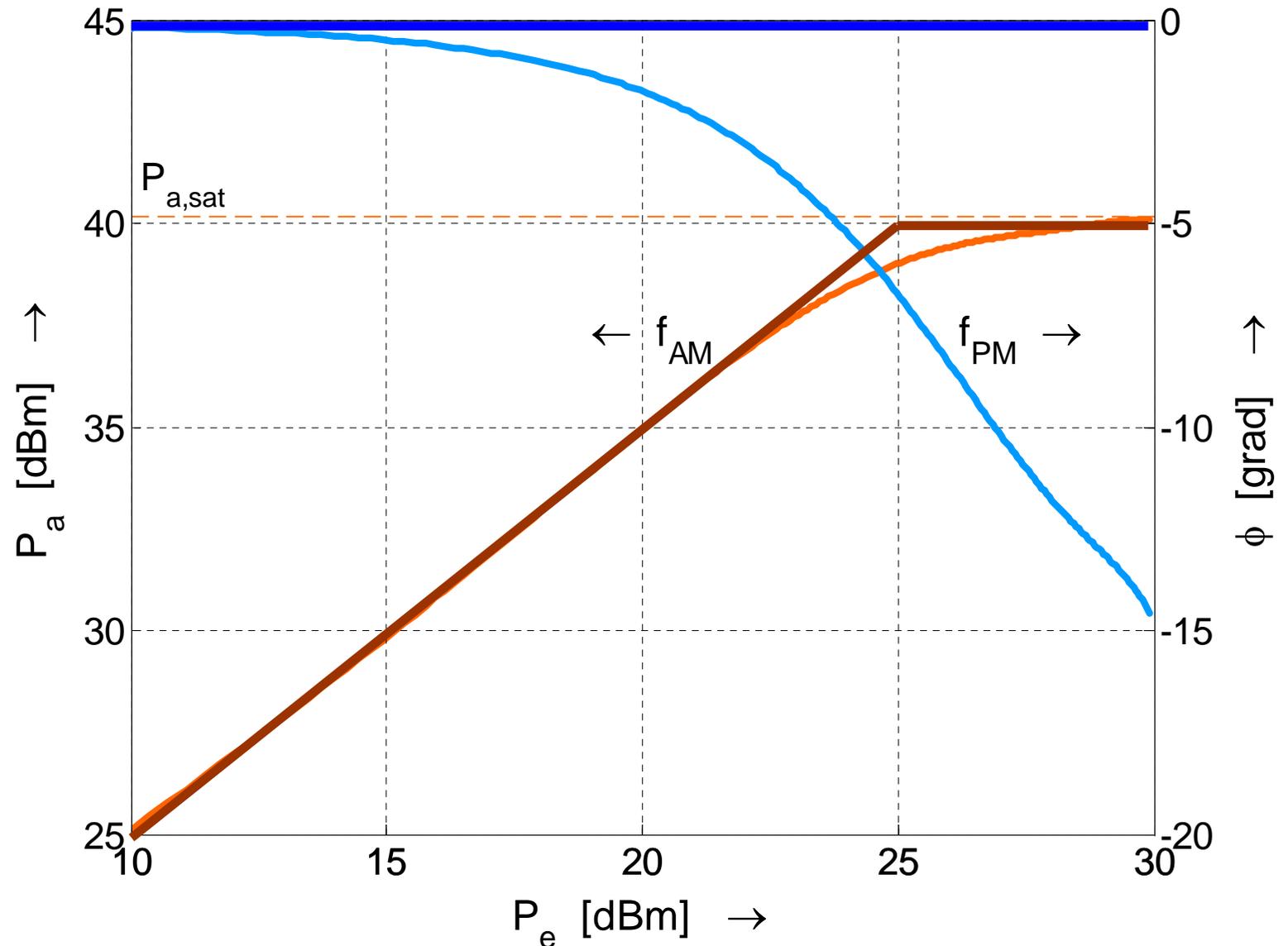
Beispiel:

Verstärker mit
LDMOS-Trans.
PTE10011

$f_{HF} = 1,4 \text{ GHz}$

$$P_e \sim |\underline{x}|^2$$

$$P_a \sim |\underline{y}|^2$$

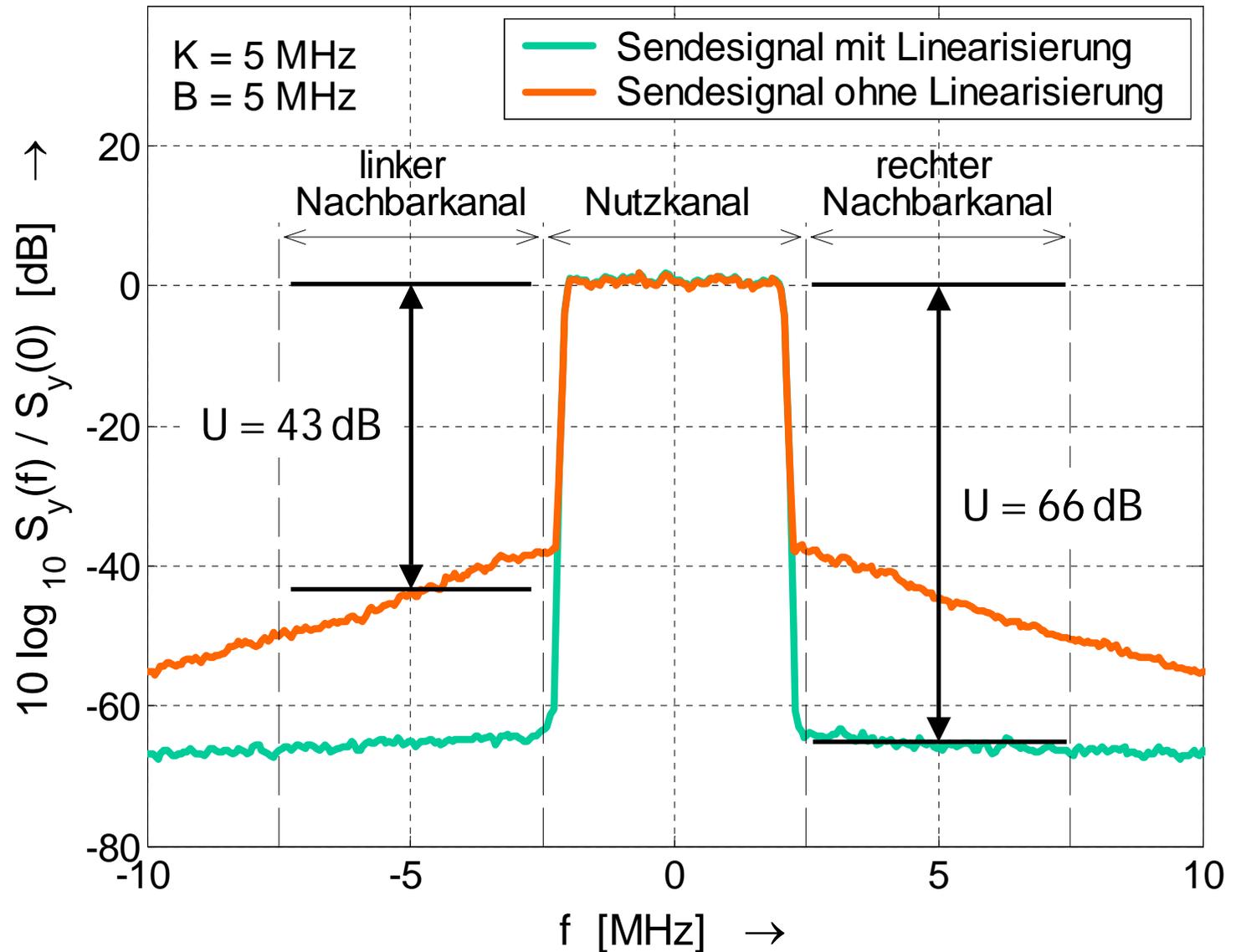




Aufgabe - Spektren

Spektren UMTS

Nachbar-
kanalunter-
drückung U

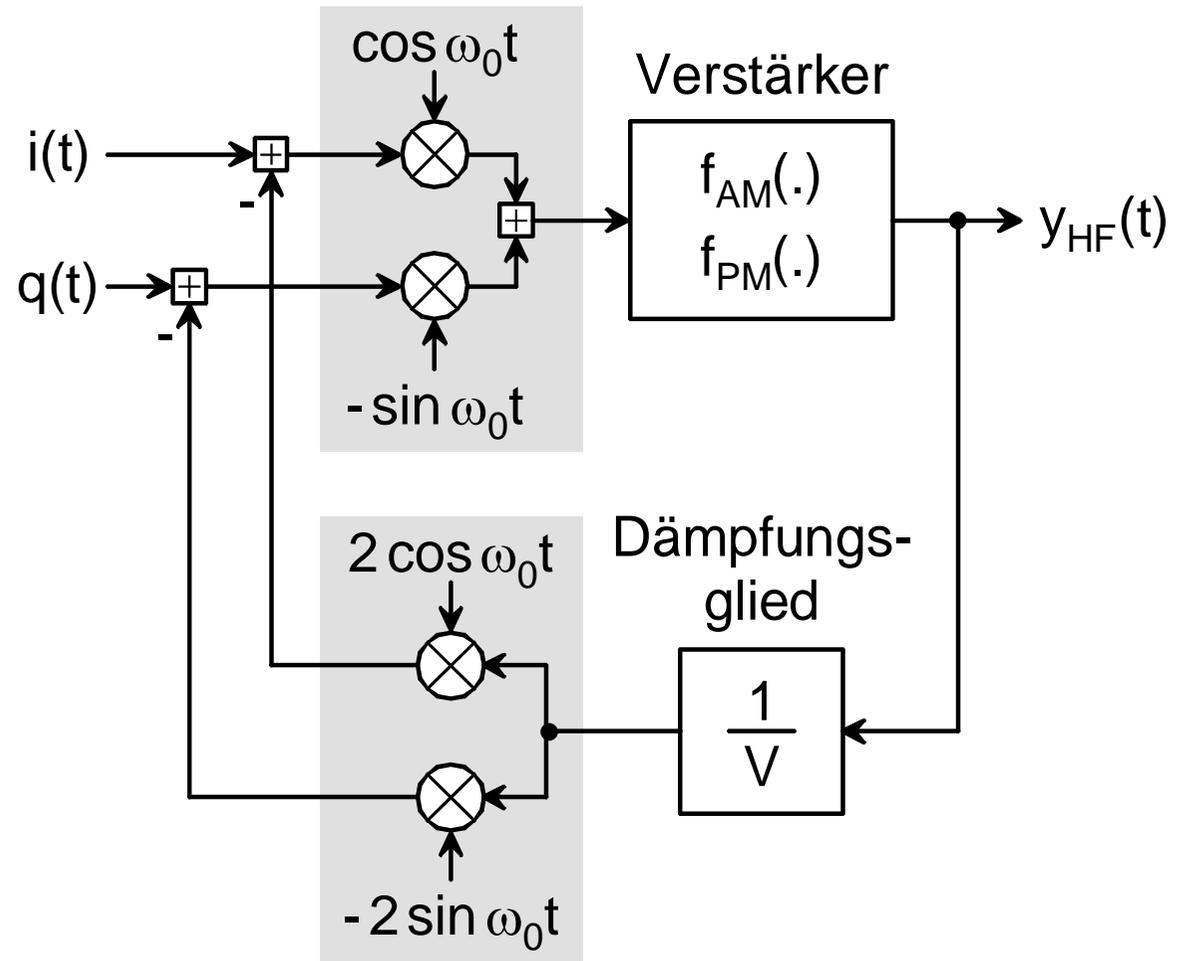
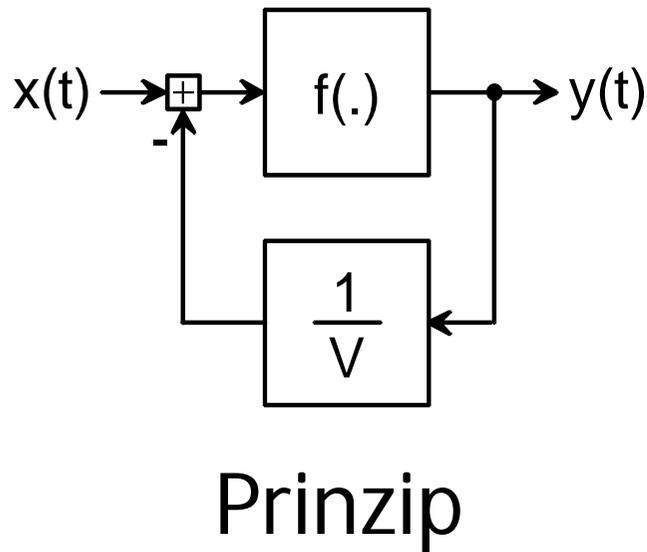




- verschiedene Linearisierungssysteme:
 - kartesischer Regelkreis
 - Vorwärtskompensation
 - Vorverzerrung
 - spezielle Systeme (ohne Bedeutung)
- praktisch eingesetzt:
 - kartesischer Regelkreis bei schmalbandigen Systemen ($B < 100$ kHz)
 - Vorwärtskompensation bei breitbandigen Systemen (CATV-Verteilverstärker)



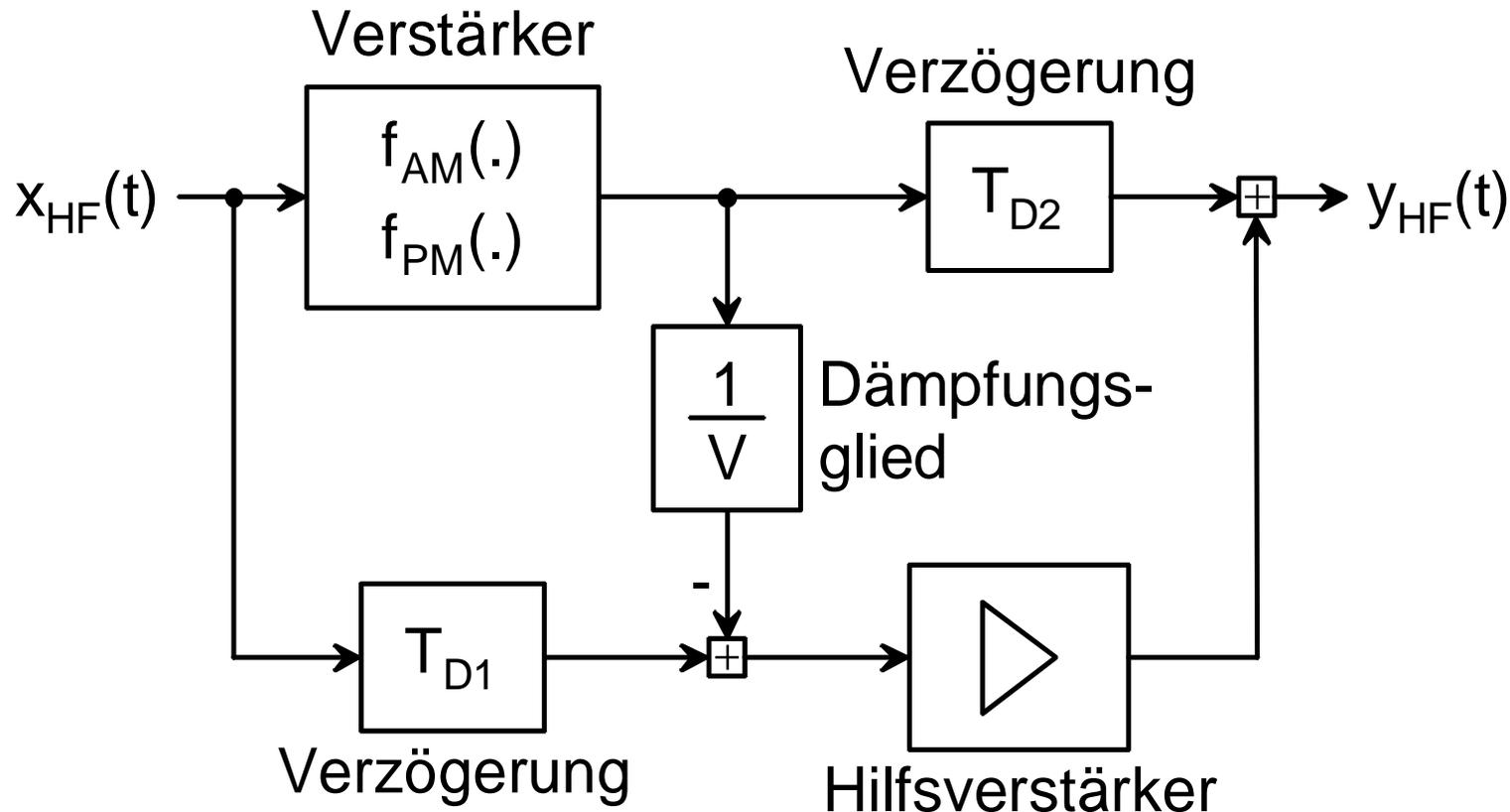
kartesischer Regelkreis



- Vorteile: einfach, geringe Verlustleistung, „adaptiv“
- Nachteile: geringe Bandbreite ($B < 100 \text{ kHz}$)



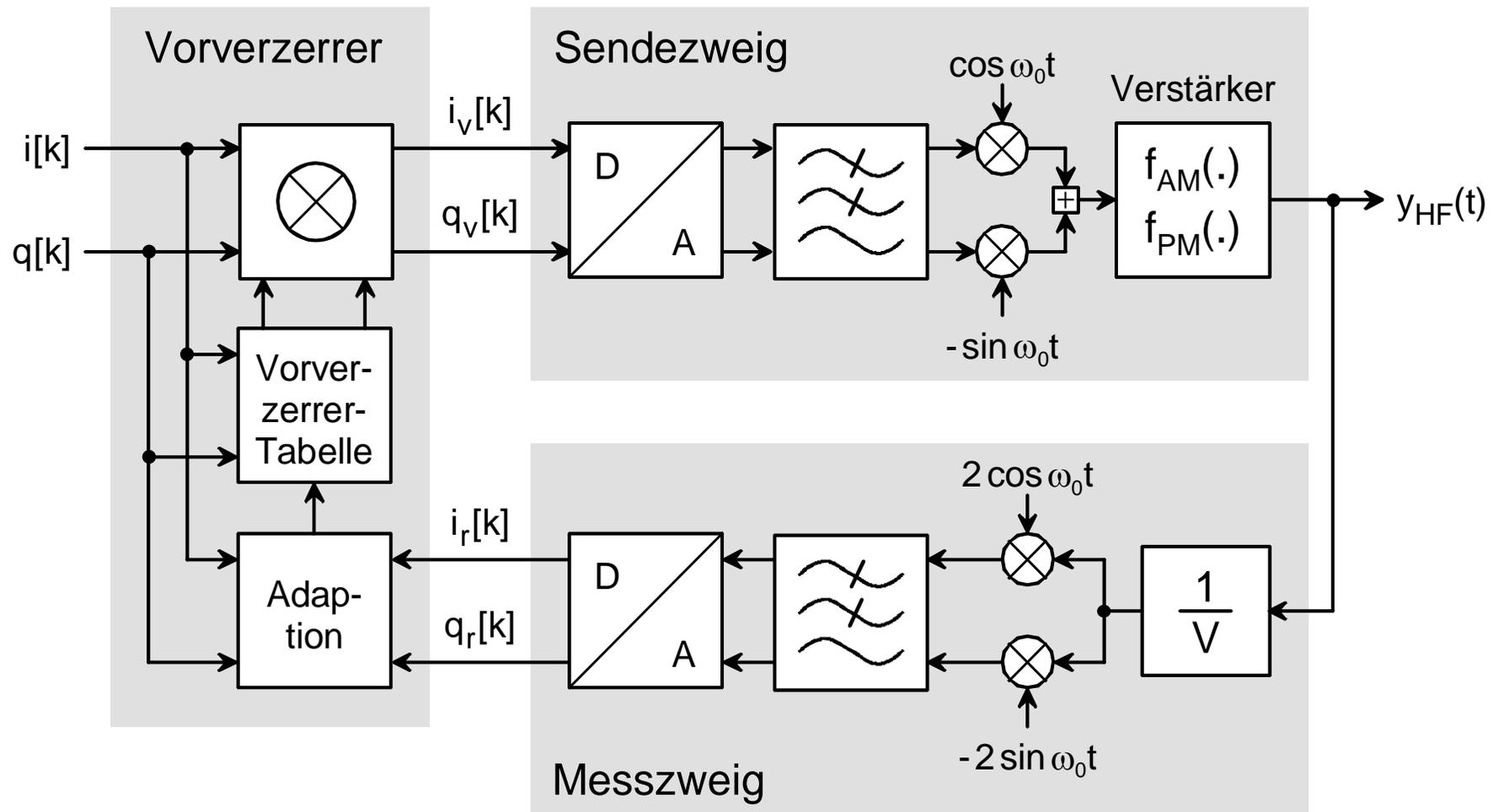
Vorwärtskompensation



- Vorteile: breitbandig, linearisiert Verstärker „an sich“
- Nachteile: empfindlich gegen Parameteränderungen, adaptive Ausführung problematisch



digitale Vorverzerrung



- Vorteile: beste Linearisierungsergebnisse, adaptiv
- Nachteile: aufwendig



Die bei einem Einsatz in Rundfunksendern und Basisstationen der Mobilkommunikation zu stellenden Anforderungen

- Breitbandigkeit
- schnelle Adaption
- hohe Nachbarkanalunterdrückung
- Miniaturisierbarkeit
- kein Abgleich in der Fertigung

können nur mit einer adaptiven, digitalen Vorverzerrung erfüllt werden.



Fragestellungen

- Erzielbare Nachbarkanalunterdrückung bei realen Verstärkern ?
- Abhängigkeit vom Modulationsverfahren ?
- Moderate Übersteuerung zulässig ?
- Benötigte Bandbreiten im Sende- und Messzweig ?
- Benötigte Wortbreiten ?
 - Vorverzerrer
 - D/A-Umsetzer im Sendezweig
 - A/D-Umsetzer im Messzweig
- Benötigte Linearität (IP3) im Messzweig ?



- Größen:

- mittlere Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Betrags

$$p_x(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Pr_t(x \leq |\underline{x}(t)| \leq x + \Delta x)}{\Delta x}$$

- maximaler „praktischer“ Betrag

$$\Pr(|\underline{x}(t)| > x_{max}^{(pr)}) = \int_{x_{max}^{(pr)}}^{\infty} p_x(x) dx = 10^{-6}$$

- „praktischer“ Spitzenwertfaktor (crest factor)

$$C_x^{(pr)} = \frac{x_{max}^{(pr)}}{\sqrt{P_x}} = \frac{x_{max}^{(pr)}}{x_{eff}}, \quad C_{x,dB}^{(pr)} = 20 \log_{10} C_x^{(pr)}$$



- Größen:

- Restübersteuerung (x_{sat} = Sättigung der idealen Kennlinie)

$$\ddot{u} = \frac{x_{\text{max}}^{(pr)}}{x_{\text{sat}}} = \frac{C_x^{(pr)} x_{\text{eff}}}{x_{\text{sat}}}, \quad \ddot{u}_{dB} = 20 \log_{10} \ddot{u}$$

- parametrische Beschreibung der mittleren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Betrags (WDF)

$$\tilde{p}_x(x) = \begin{cases} \frac{a_W}{x_{\text{eff}}} \left(C_W - \frac{x}{x_{\text{eff}}} \right)^{p_W} & \text{für } x < C_W x_{\text{eff}} \\ 0 & \text{für } x \geq C_W x_{\text{eff}} \end{cases}$$

- wichtig: Exponent p_W der WDF



- Nachbarkanalunterdrückung U bei idealer Kennlinie:
 - mit WDF des Signals

$$U \approx \frac{3P_x}{P_E} = \frac{3 \int_0^{\infty} x^2 p_x(x) dx}{\int_{x_{sat}}^{\infty} (x - x_{sat})^2 p_x(x) dx}$$

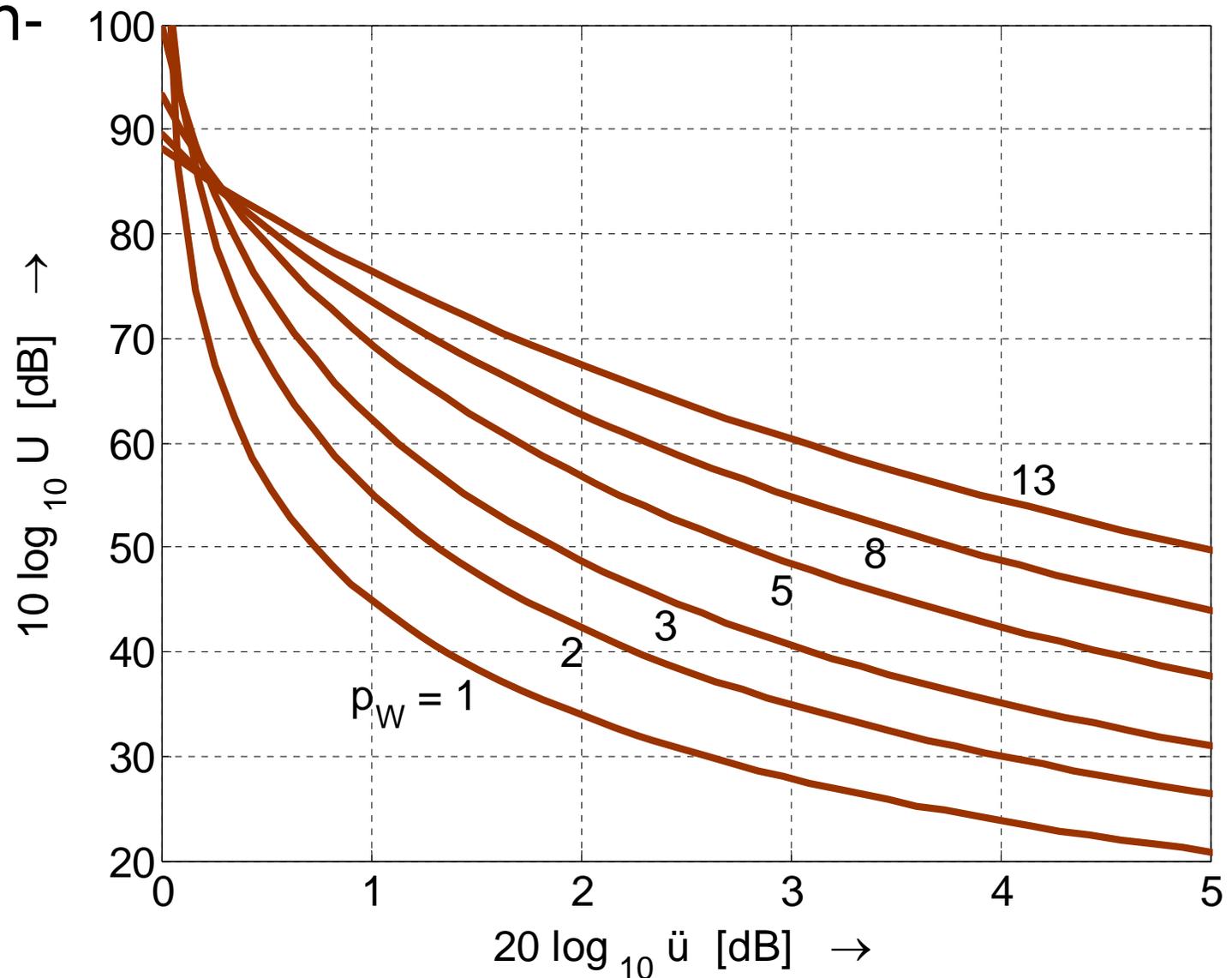
- mit parametrischer Beschreibung der WDF

$$U(\ddot{u}) \approx \frac{3}{a_W \int_0^{C_W - C_x^{(pr)}/\ddot{u}} z^2 \left(C_W - \frac{C_x^{(pr)}}{\ddot{u}} - z \right)^{p_W} dz}$$



Signale

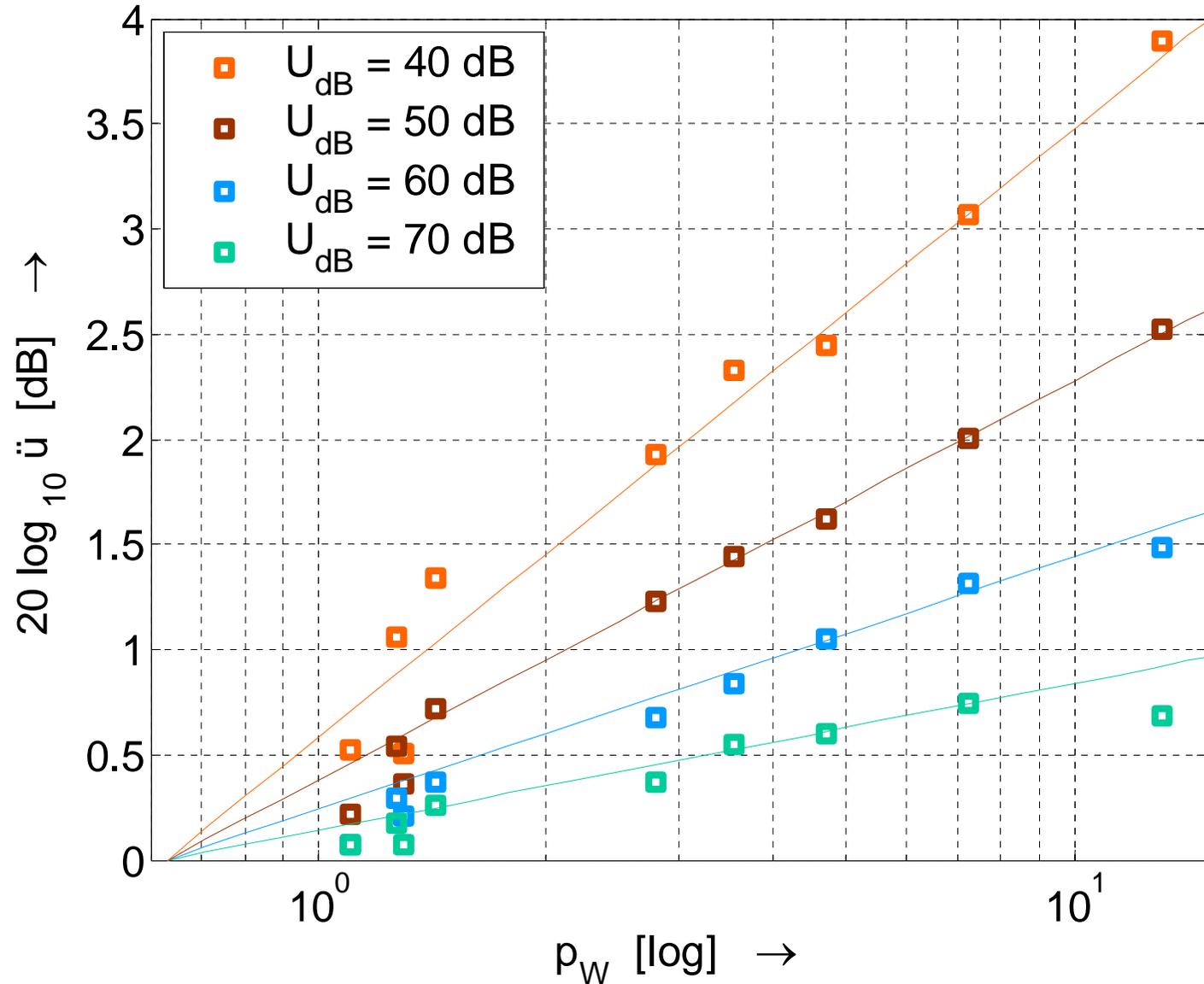
Verlauf der Nachbarkanalunterdrückung U in Abhängigkeit vom Exponenten p_W der WDF





Signale

Zusammenhang zwischen dem Exponenten p_W der WDF und der zulässigen Restübersteuerung \ddot{u} bei vorgegebener Nebenkanaalunterdrückung U





- parametrische Beschreibung der Kennlinien

$$\tilde{f}_{AM}(|\underline{x}|, p_{AM}) = \begin{cases} |\underline{x}| - \alpha_{AM} |\underline{x}|^{p_{AM}} & \text{für } 0 \leq |\underline{x}| < x_{AM,sat} \\ 1 & \text{für } |\underline{x}| \geq x_{AM,sat} \end{cases}$$

$$\alpha_{AM} = \frac{(p_{AM} - 1)^{p_{AM}-1}}{(p_{AM})^{p_{AM}}}$$

$$\tilde{f}_{PM}(|\underline{x}|, p_{PM}, \phi_{PM}) = \phi_{PM} |\underline{x}|^{p_{PM}-1}$$

- Faktor zur Beschreibung der Signaleigenschaften

$$k_x(p_{AM}) = \frac{P_x}{\max \left\{ \int_{-K-B/2}^{-K+B/2} S_{x^{p_{AM}}}(f) df, \int_{K-B/2}^{K+B/2} S_{x^{p_{AM}}}(f) df \right\}}$$



- Berechnung der Nachbarkanalunterdrückung U in Abhängigkeit von der Restübersteuerung \ddot{u}

$$U_{AM}(\ddot{u}) \approx \frac{k_x(p_{AM})}{\alpha_{AM}^2} \left(\frac{1}{\ddot{u}} \right)^{2p_{AM}-2}$$

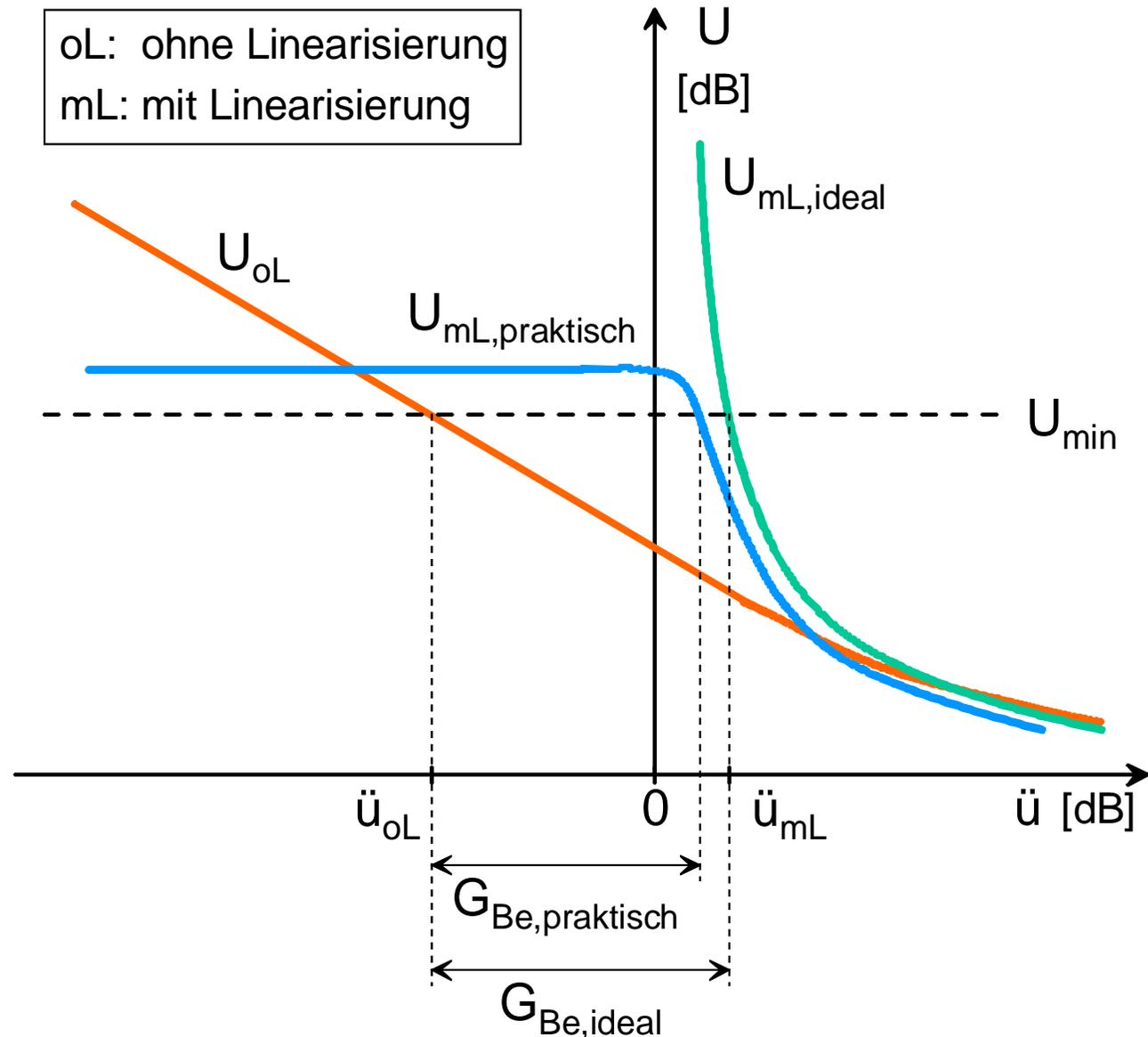
$$U_{PM}(\ddot{u}) \approx \frac{k_x(p_{PM})}{\phi_{PM}^2} \left(\frac{1}{\ddot{u}} \right)^{2p_{PM}-2}$$

- Vergleich mit Nachbarkanalunterdrückung bei idealer (= ideal linearisierter) Kennlinie ergibt:
 - Aussteuerung ohne/mit Linearisierung
 - Aussteuerungsgewinn durch die Linearisierung



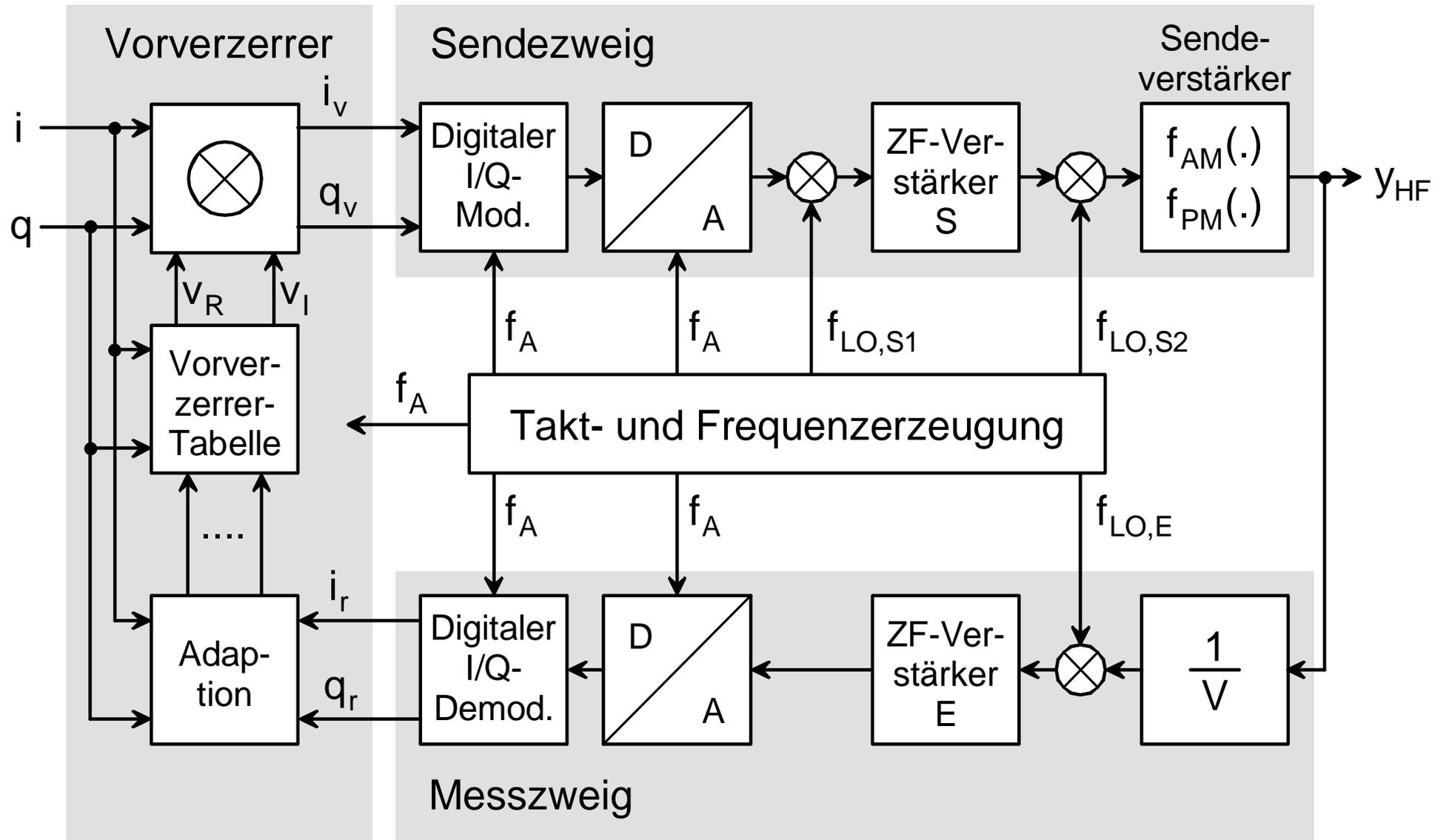
Verstärker

Aussteuerungsgewinn G_{Be} bei idealer und „praktischer“ Linearisierung
 (U_{min} = geforderte Nachbar-kanalunterdr.)





Linearisierungssystem





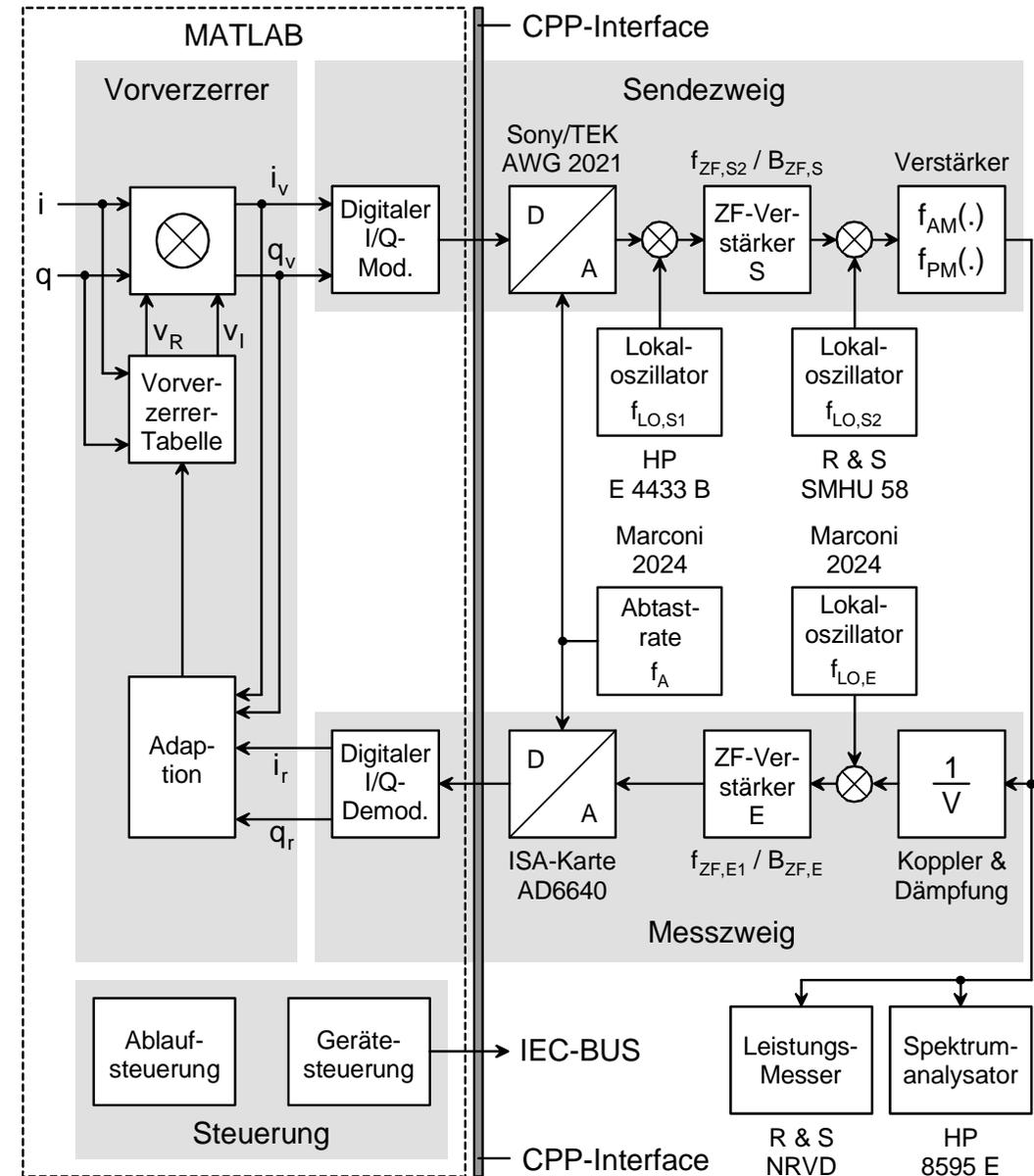
Linearisierungssystem

- neuartige, aufwandsminimale Realisierung von Vorverzerrer und digitalem I/Q-Modulator
- neuartige Regelung zum Ausgleich der Laufzeit im Sende- und Messzweig
- Adaption mit Standard-RLS-Verfahren
- Simulationsmodell mit allen wichtigen Parametern:
 - Wortbreiten im Digitalteil
 - Bandbreiten der ZF-Filter
 - Frequenzgangfehler
 - Nichtlinearitäten



Demonstrator

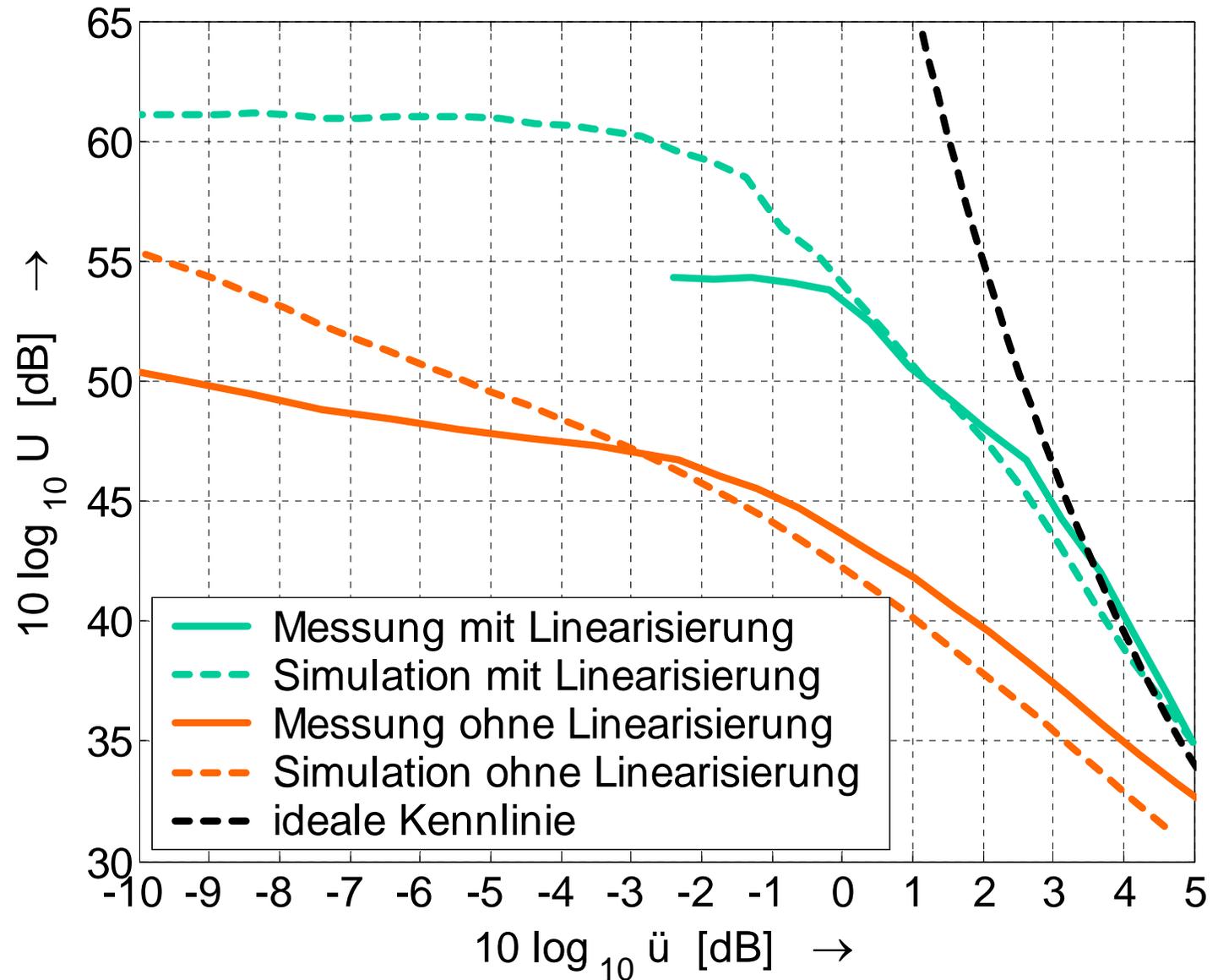
- Hardware + MATLAB
- handelsübliche Messgeräte + spezielle Hardware
- Hardware-Steuerung über IEC-Bus und CPP-Interface
- Parallelbetrieb von Demonstrator und Simulator erlaubt direkten Vergleich





Messergebnisse

Nachbarkanal-
unterdrückung
mit und ohne
Linearisierung





Messergebnisse

Vorgabe	Restübersteuerung		Sendeleistung		Wirkungsgrad	
	\ddot{u}_{oL} [dB]	\ddot{u}_{mL} [dB]	$P_{HF,oL}$ [dBm]	$P_{HF,mL}$ [dBm]	$\eta_{B,oL}$ [%]	$\eta_{B,mL}$ [%]
40	2	4	31	33	28	36
45	-0,9	3	28,1	32	18	32
50	-9,4 (-5,3)	1,1	19,6 (23,7)	30,1	4 (9)	24
55	(-9,7)	(-0,3)	(19,3)	(28,7)	(4)	(20)

- 1) oL: ohne Linearisierung
mL: mit Linearisierung
- 2) simulierte Werte in Klammern
- 3) Messgrenze des Demonstrators: $U = 54$ dB



Zusammenfassung

- Ermittlung der Grenzen einer Linearisierung mit Hilfe von parametrischen Beschreibungen der WDF der Signale und der Verstärker
- Systemplanung, Modellbildung und Simulation eines Linearisierungssystem mit digitaler Vorverzerrung
- Ermittlung sämtlicher Dimensionierungsgrößen für den Einsatz in einer UMTS-Basisstation
- Aufbau eines Demonstrators zur Verifikation der Simulationsergebnisse
- Ergebnis: deutliche Zunahme von Sendeleistung und Wirkungsgrad



Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit



Haben Sie Fragen ?

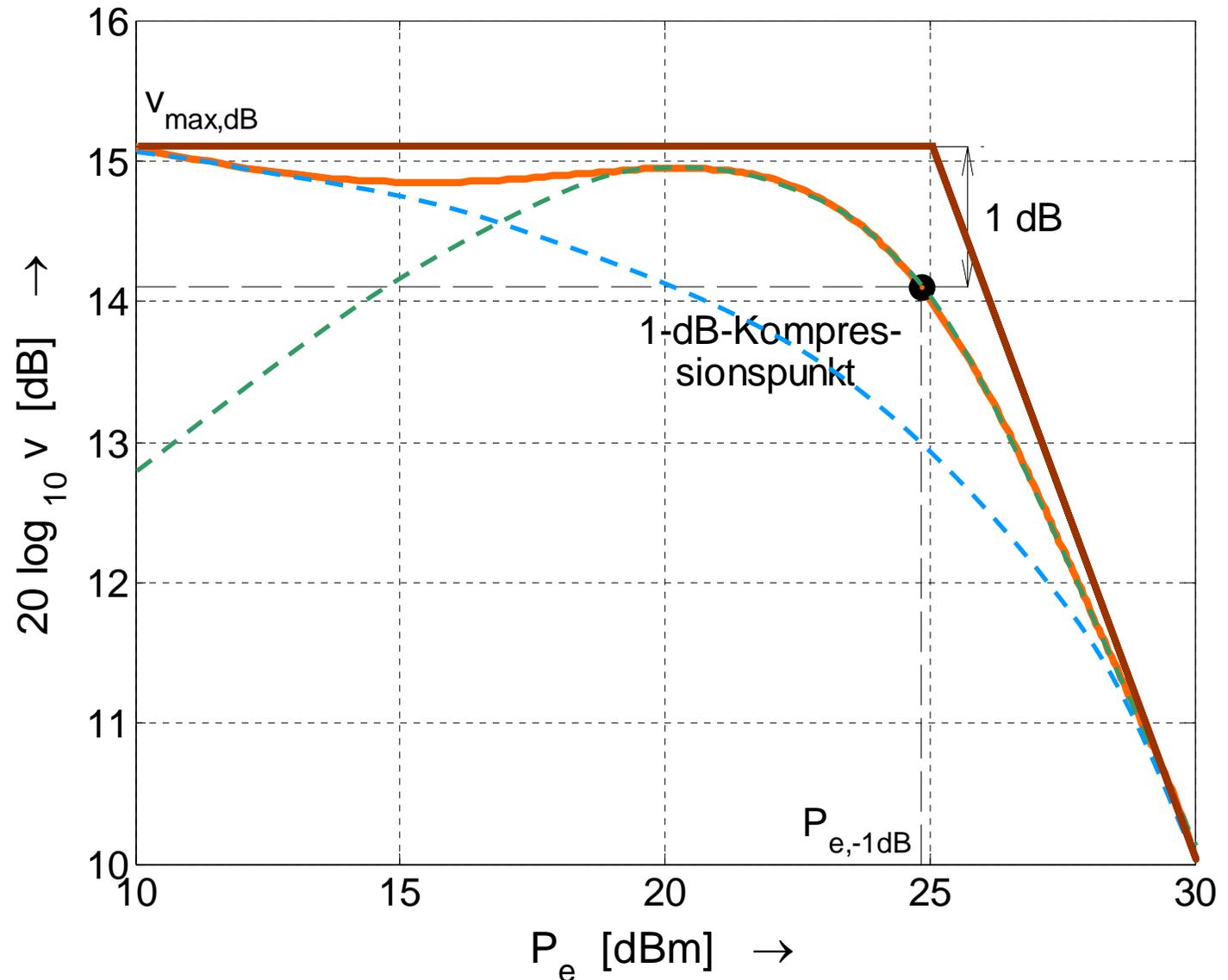
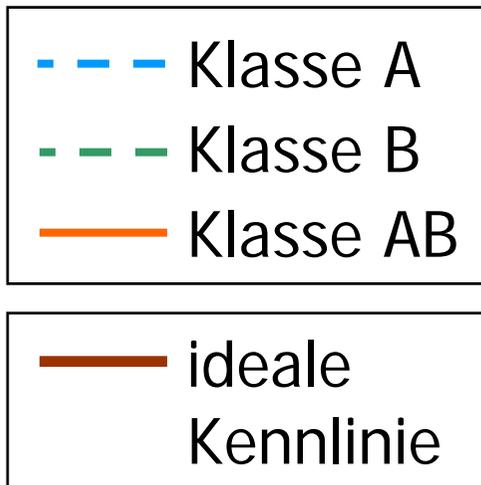


Aufgabe - Verstärker

Beispiel:

Verstärker mit
LDMOS-Trans.
PTE10011

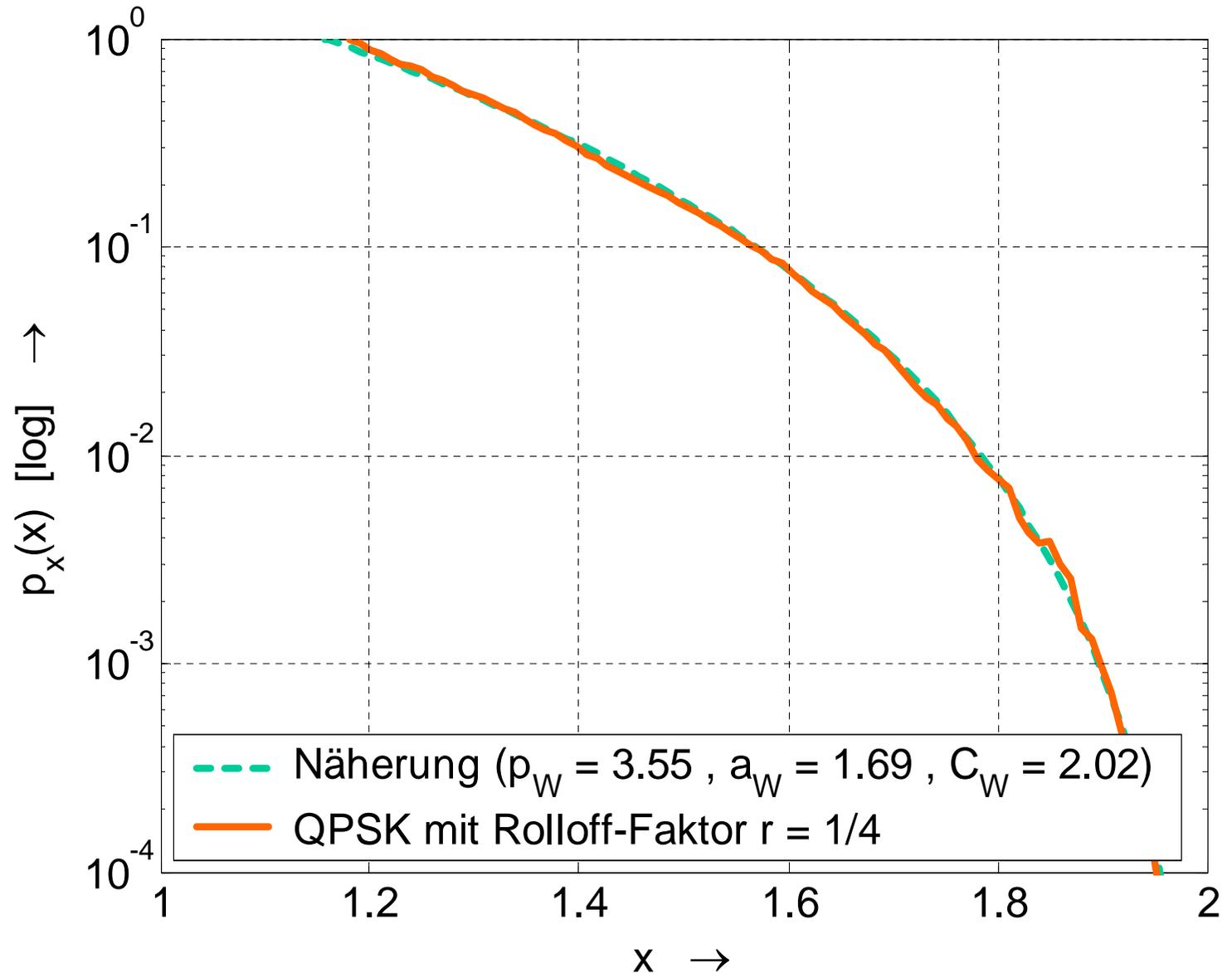
$f_{HF} = 1,4 \text{ GHz}$





Signale - Beispiel

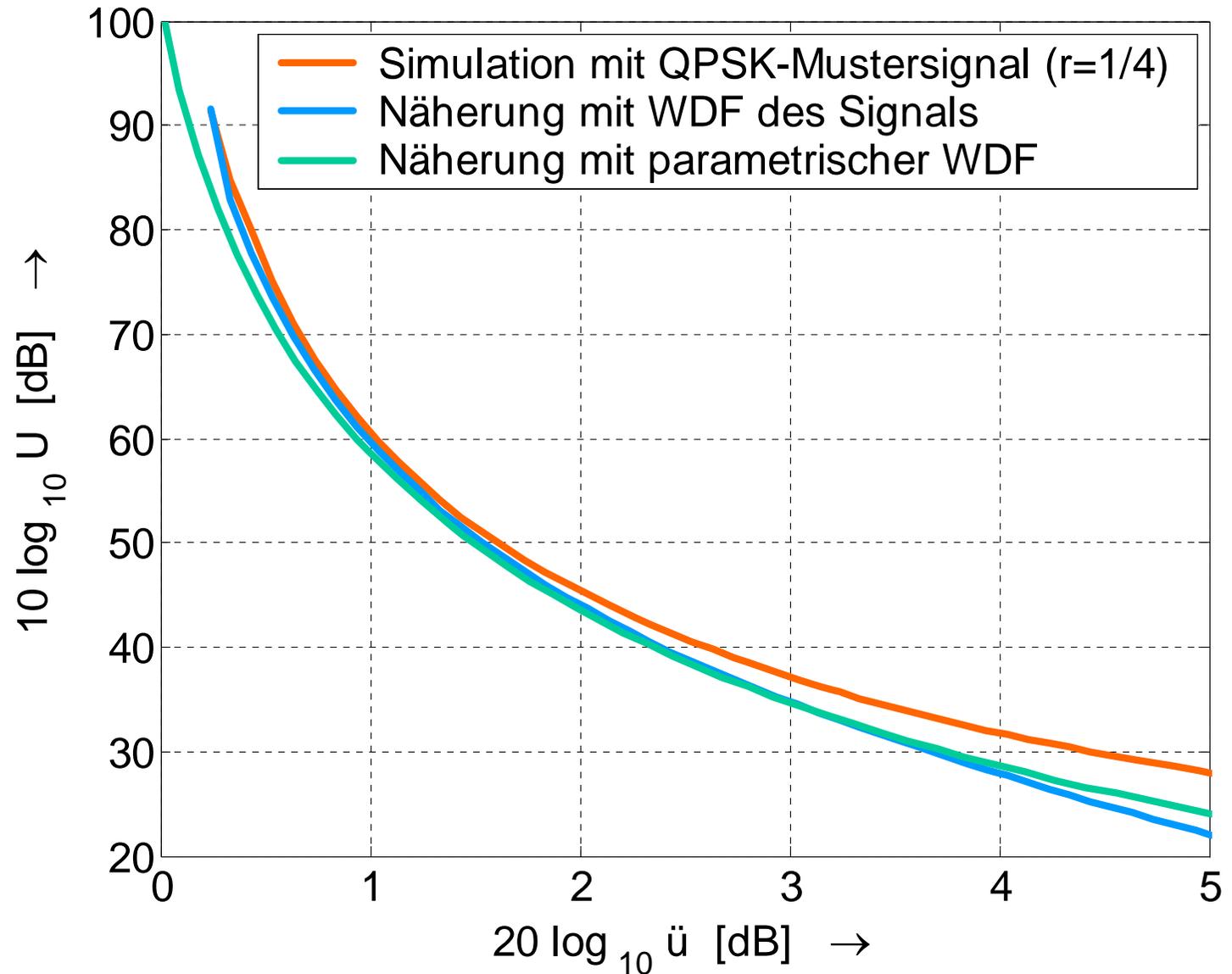
WDF und parametrische Beschreibung für ein QPSK-Signal





Signale - Beispiel

Nachbarkanal-
unterdrückung
U für ein
QPSK-Signal



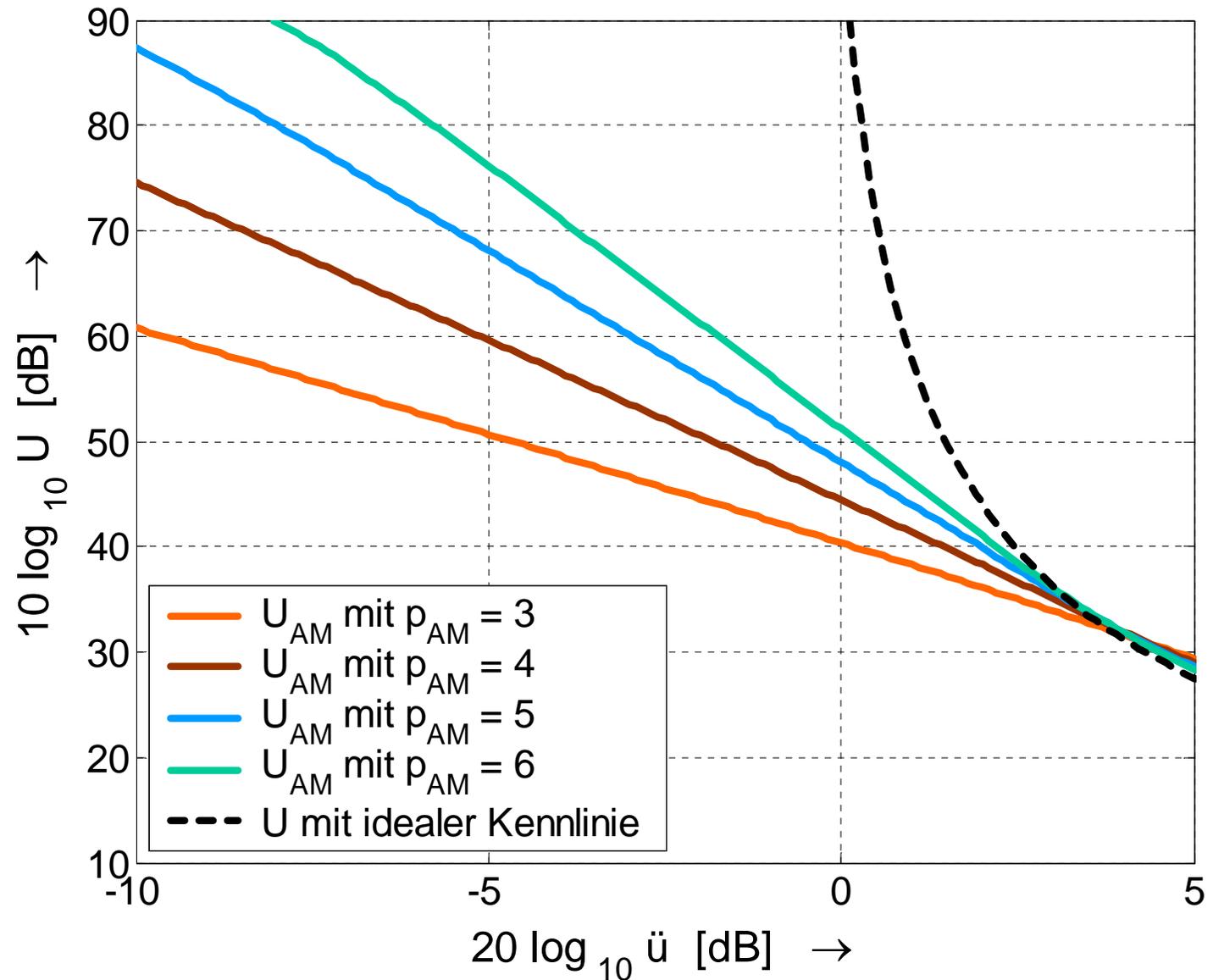


- Die Eigenschaften der Signale bezüglich der Nachbarkanalunterdrückung bei einer Restübersteuerung können mit den Parametern p_W , a_W und C_W der parametrischen Beschreibung der WDF ausreichend genau beschrieben werden.
- Bei Signalen mit einem grösseren Spitzenwertfaktor ist bei gleicher Nachbarkanalunterdrückung eine grössere Restübersteuerung zulässig; dadurch ist die Situation bei rauschartigen Signalen weniger ungünstig als erwartet.



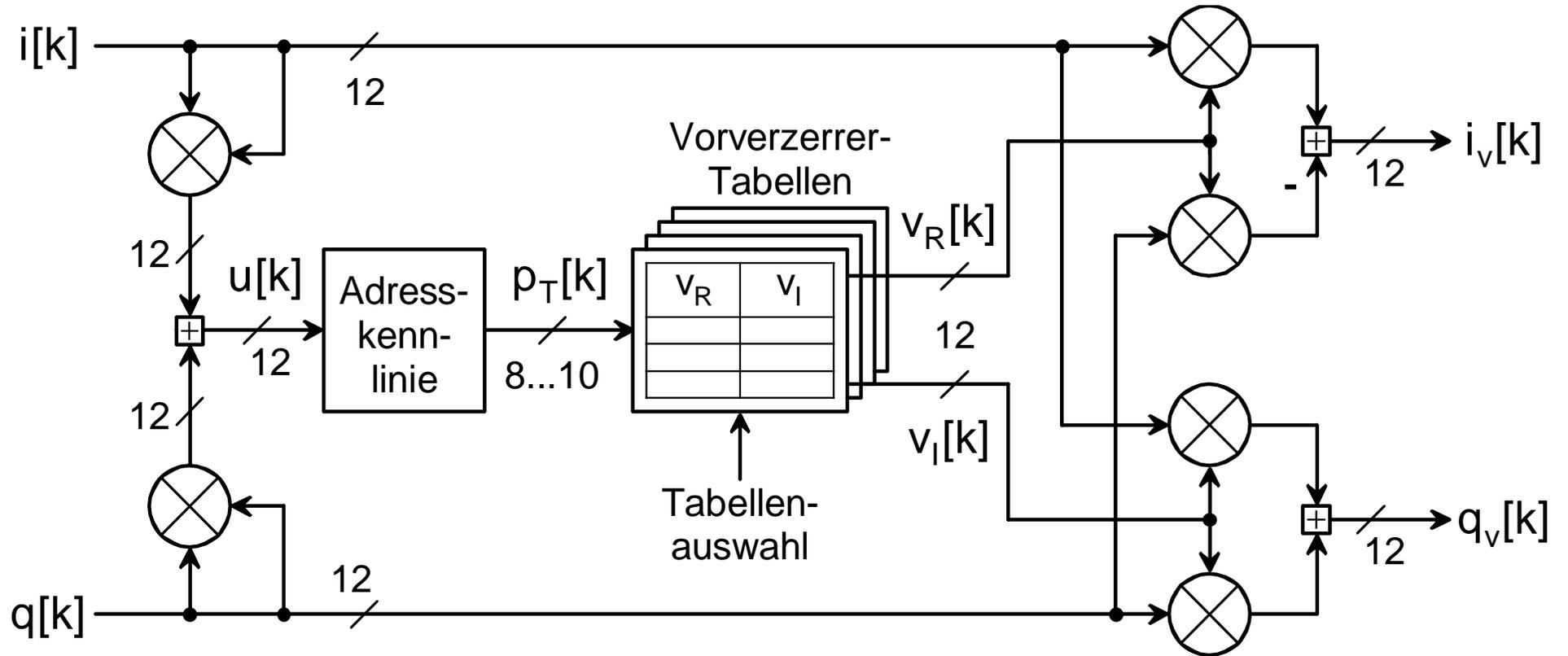
Verstärker - Beispiel

Nachbarkanal-
unterdrückung
 U_{AM} in Abhän-
gigkeit vom
AM/AM-Para-
meter p_{AM}
(QPSK-Signal)



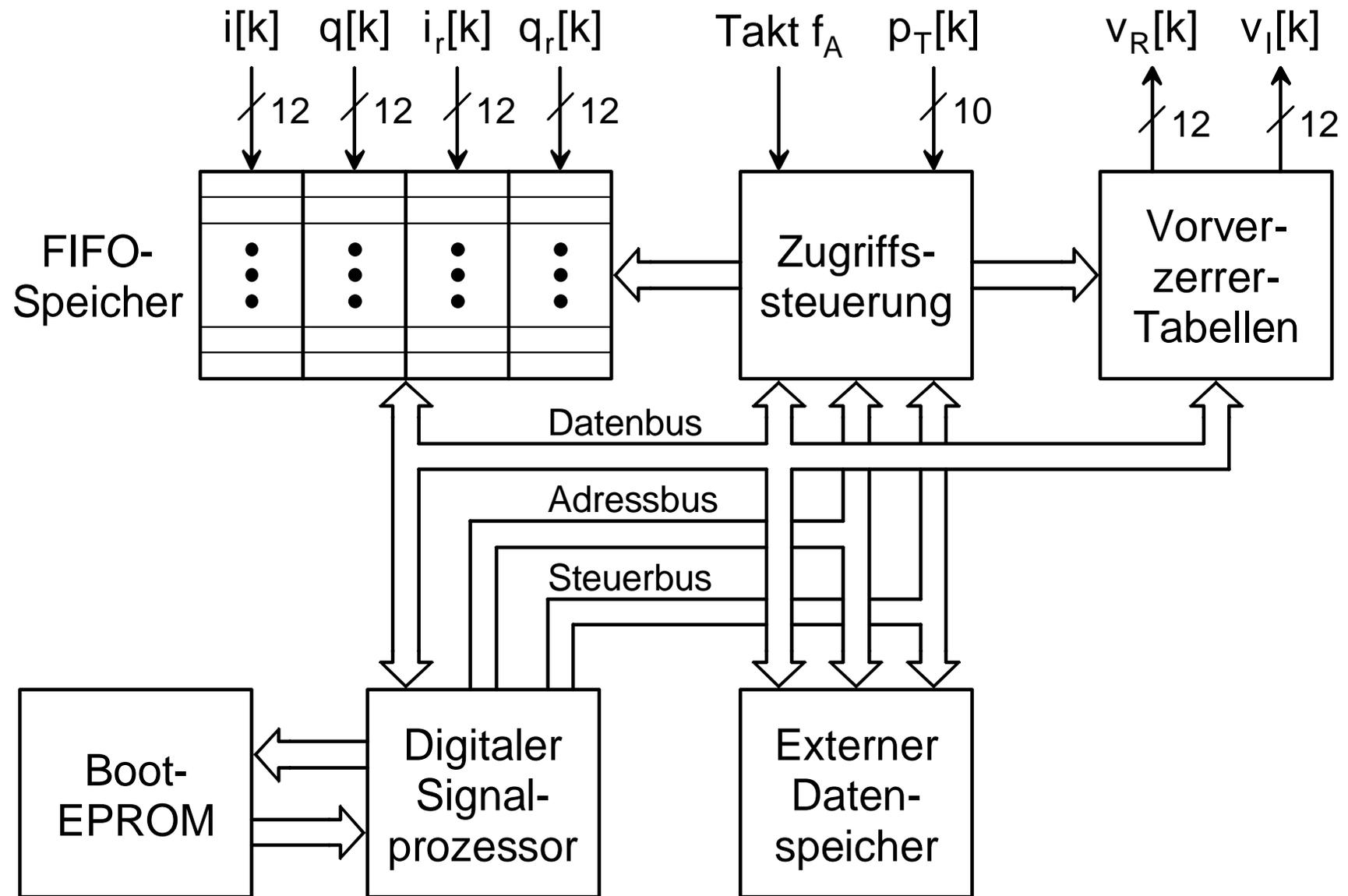


Vorverzerrer



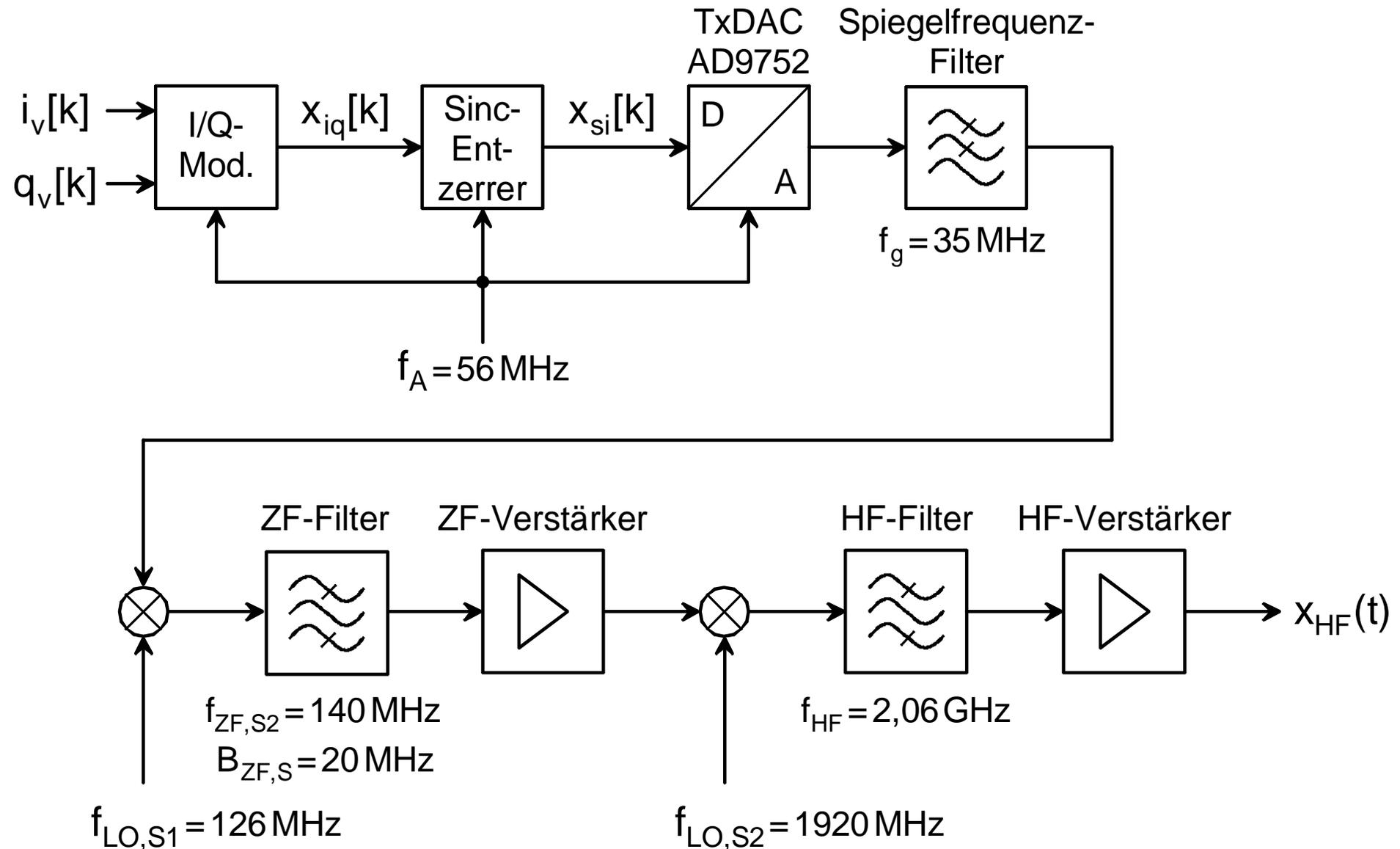


Vorverzerrer - Adaption





Sendezweig





Messzweig

