

# Verkopplungsmechanismen in integrierten Schaltungen für den Mobilfunk

## Diplomarbeit

Adam Buck

Infineon Technologies AG

Fachgebiet Hochfrequenztechnik  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Universität Duisburg-Essen

22. September 2008

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN



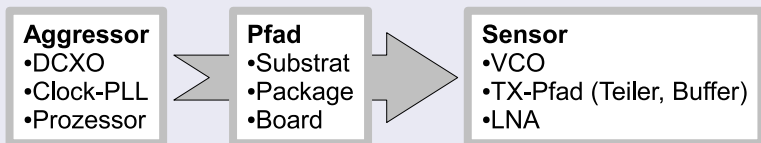
# Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Aggressor
- 3 Sensor
- 4 Verkopplungspfade
- 5 Zusammenfassung



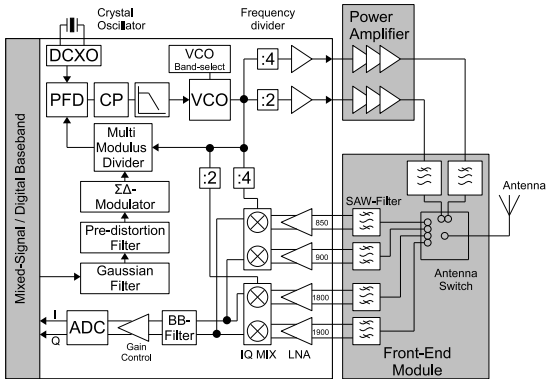
- Integration von digitalen und analogen Schaltkreisen auf einem Chip
- steigende Taktraten und kleiner werdende Strukturgrößen
- Herausforderung bei SoC Entwicklung

## Verkopplung

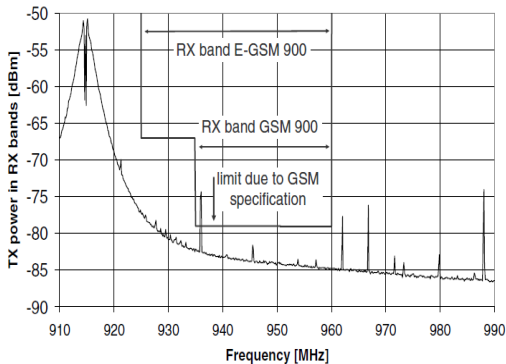


- Spurs
- Degradierung des Modulationsspektrums
- Störung im Empfangsband
- Verletzung der GSM-Spezifikation

# Transceiver



# Störung im Empfangsband



- Klassifizierung in drei Gruppen
- unterschiedliche Entstehungsmechanismen

### $\alpha$ -Spurs

$$f_{TX} \neq n \cdot f_{ref}, \quad f_{TX} \approx n \cdot f_{ref}, \quad f_{\alpha} = \begin{cases} 2 \cdot f_{TX} - n \cdot f_{ref} \\ n \cdot f_{ref} \end{cases}$$

### $\beta$ -Spurs

$$f_{VCO} \neq n \cdot f_{ref}, \quad f_{VCO} \approx n \cdot f_{ref}, \quad f_{\beta} = \begin{cases} (1 + m) \cdot f_{TX} - n \cdot f_{ref} \\ (1 - m) \cdot f_{TX} + n \cdot f_{ref} \end{cases}$$

### $\gamma$ -Spurs

$$f_{\gamma} = f_{TX} \pm n \cdot f_{ref}$$

# Übersicht

- 1 Einleitung
- 2 Aggressor**
- 3 Sensor
- 4 Verkopplungspfade
- 5 Zusammenfassung

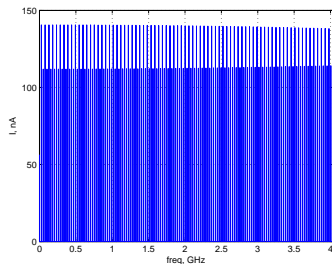
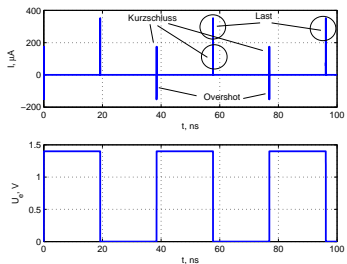


## Untersuchung des Aggressors

- digitale Schaltung
- hartes Schalten der Logik-Gatter erzeugt breitbandiges Störspektrum  
⇒ „Switching Noise“
- Spannungsabfall über parasitären Leitungskomponenten
- Injektion ins Substrat über kapazitive Kopplung
- Entstehung der Störung
- Maßnahmen zur Reduzierung der Störung



## Switching Noise



$$\bar{i}_L = \frac{1}{T} \int i_L(t) dt = C_L \cdot V_{DD} \cdot f$$

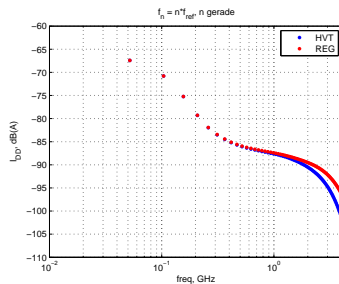
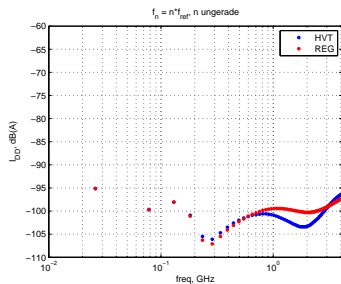
$$\bar{i}_{KS} = \frac{1}{6} \cdot \frac{K_n}{V_{DD}} \cdot \frac{T}{T} \cdot (V_{DD} - 2 \cdot V_{th})^3$$

$$\bar{i}_S = \frac{1}{T} \int C_C \cdot \left( \frac{du_e}{dt} - \frac{du_a}{dt} \right) dt$$



## Digitally Controlled Crystal Oscillator

- erzeugt aus Sinus-Signal des Quarzoszillators ein Rechtecksignal
- Verteilung des Clocksignals
- Logik-Gatter durch HVT-Elemente ersetzt



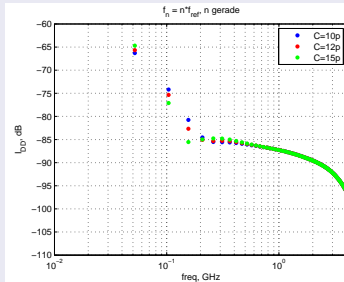
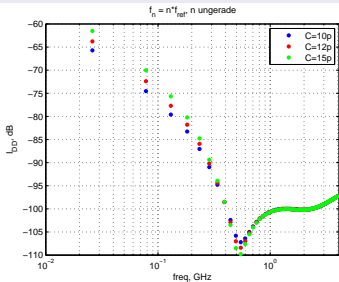
- keine Reduzierung der NF-Komponenten
- teilweise Reduzierung der HF-Komponenten



## Lastabhängigkeit des DCXO

- Abhängigkeit der spektralen Komponenten von der Last
- Last:  $R \parallel C$

## Variation von $C$ , $R = \infty$



- kein Einfluss auf hohe Frequenzen
- Reduzierung der NF-Aggression



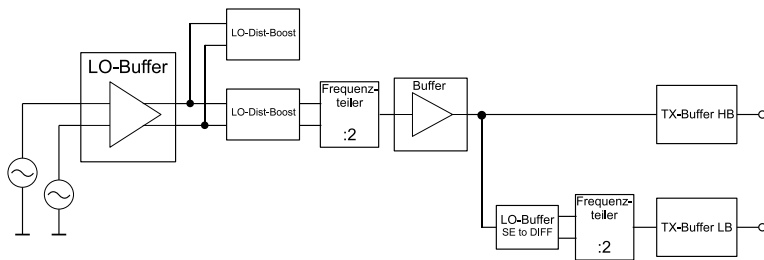
# Übersicht

- 1 Einleitung
- 2 Aggressor
- 3 Sensor**
- 4 Verkopplungspfade
- 5 Zusammenfassung



# Einfluss der Versorgungsspannung-Störung auf den Sender

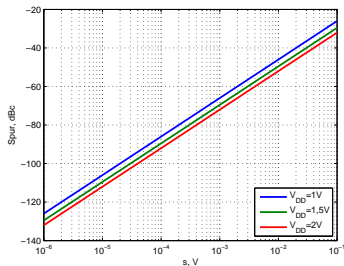
- Empfindlichkeit der TX-Kette gegenüber Störung der Versorgungsspannung
- Auswirkungen auf das Ausgangssignal
- Amplituden- und Phasenmodulation



# Amplitudenmodulation

$$v(t) = \frac{V_{DD}}{2} \cdot A_1 \cdot \cos(\omega_T \cdot t) + \frac{\hat{s}}{4} \cdot A_1 \cdot [\cos((\omega_T - \omega_S) \cdot t) + \cos((\omega_T + \omega_S) \cdot t)]$$

$$A_1 = \frac{4}{\pi}$$



## Spurhöhe

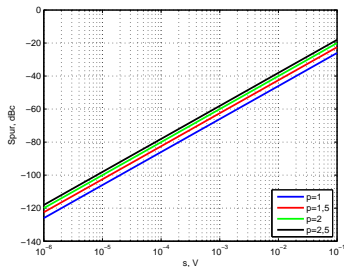
$$Spur [dBc] = 20 \cdot \log \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\hat{s}}{V_{DD}} \right)$$



# Phasenmodulation

$$v(t) = \bar{v} + \hat{v} \cdot A_1 \cdot \left[ \cos(\omega_T \cdot t) + \frac{m}{2} \cdot [\cos((\omega_T - \omega_S) \cdot t) - \cos((\omega_T + \omega_S) \cdot t)] \right]$$

$$m = p \cdot \hat{s}$$

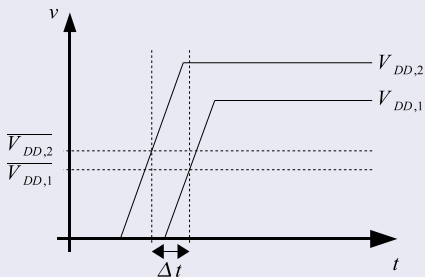


## Spurhöhe

$$Spur[dBc] = 20 \cdot \log\left(\frac{m}{2}\right)$$



## Bestimmung der „Pushing Figure“



$$p = \frac{m}{\hat{s}} = \frac{2\pi \cdot \Delta t}{T \cdot \hat{s}}$$

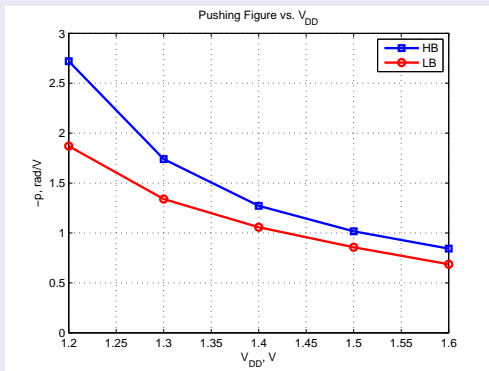
$$t_{pdHL} \approx \frac{2C_L V_{DD}}{\beta_n (V_{DD} - V_{TN})^2}$$

$$p = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{dt_{pdHL}}{dV_{DD}}$$

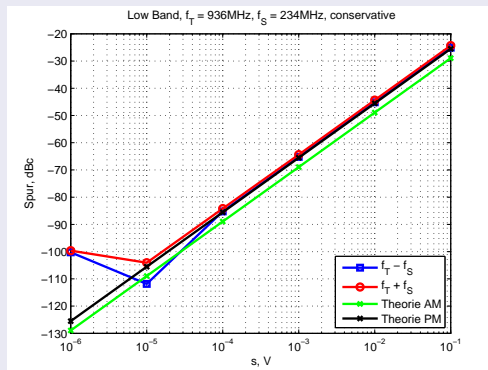
- Spannungsabhängig
- Temperaturabhängig
- abhängig von Prozessschwankungen



## Spannungsabhängigkeit



„Pushing Figure“ ist im Low Band kleiner



- Überlagerung der AM und PM
- Spurs im Low-Band geringer
- keine ausreichende Simulations-Genauigkeit bei kleinen Störampplituden
- Genauigkeitseinstellung „conservative“ liefert beste Ergebnisse
- analytische Berechnung notwendig

# Übersicht

- 1 Einleitung
- 2 Aggressor
- 3 Sensor
- 4 Verkopplungspfade**
- 5 Zusammenfassung

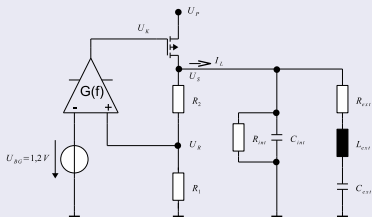


# Verkopplung über das Spannungsversorgungssystem

- Spannungsversorgung durch Spannungsregler
- Unterdrückung der Wechselanteile am Eingang
- Entkopplung von den Laststromschwankungen
- Ausbreitung der Störung über das Spannungsversorgungsnetzwerk



## Spannungsregler



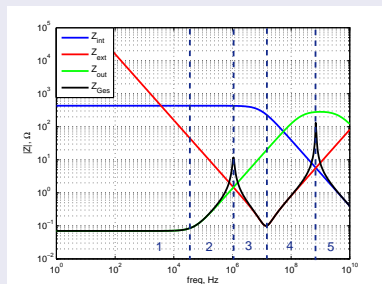
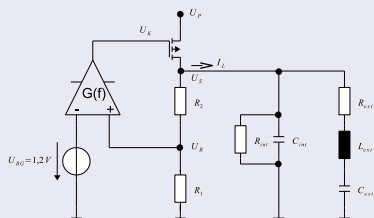
$$Z_{out} = \frac{1}{g_m \cdot x_R \cdot \frac{g_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}} + \frac{1}{r_{DS}} + j\omega C_{DS}}$$

$$x_R = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad G(f) = \frac{g_0}{1+j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$Z_{ext} = R_{ext} + j\omega L_{ext} + \frac{1}{j\omega C_{ext}}$$

$$Z_{int} = \frac{1}{\frac{1}{R_{int}} + j\omega C_{int}}$$

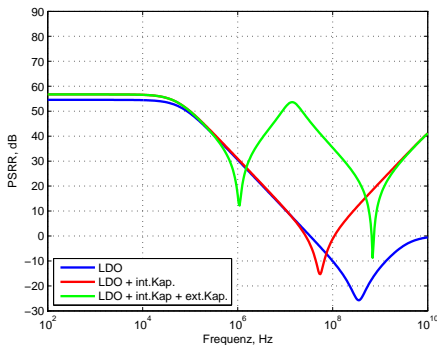
## Spannungsregler



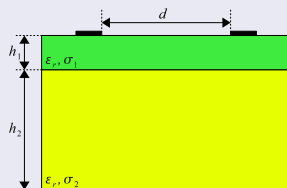
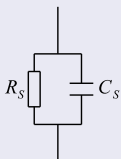
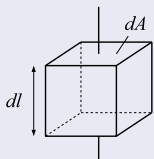
## Power Supply Rejection Ratio

$$PSRR = 20 \log \left( \frac{\hat{u}_{in}}{\hat{u}_{out}} \right) = 20 \log \left( \frac{u_P}{u_S} \right)$$

$$\frac{u_P}{u_S} = \frac{\frac{1}{Z_{Ges}}}{g_m + \frac{1}{Z_{DS}}}$$



# Substratverkopplung



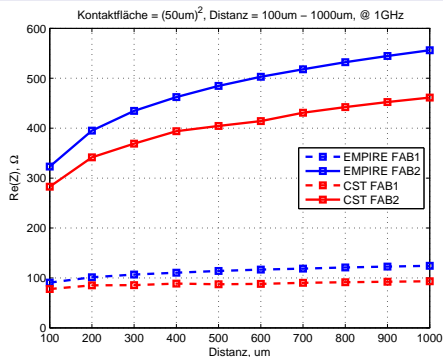
Simulations-Software:

- EMPIRE
- CST Microwave Studio



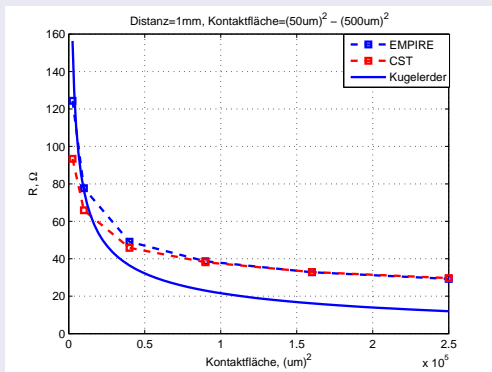


## Simulationsergebnisse



- Verkopplung über Substrat, bei kleinen Abständen und großen Kontaktflächen (FAB1)

## Abschätzung des Substratwiderstandes



- Anordnung aus zwei Halbkugelerdern
- Oberfläche der Halbkugelerder entspricht der Fläche der Baugruppen

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\pi \kappa r} \cdot \frac{d-2r}{d-r}$$



# Zusammenfassung

## Untersuchung

- des Aggressors
- des Sensors
- verschiedener Verkopplungspfade



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

