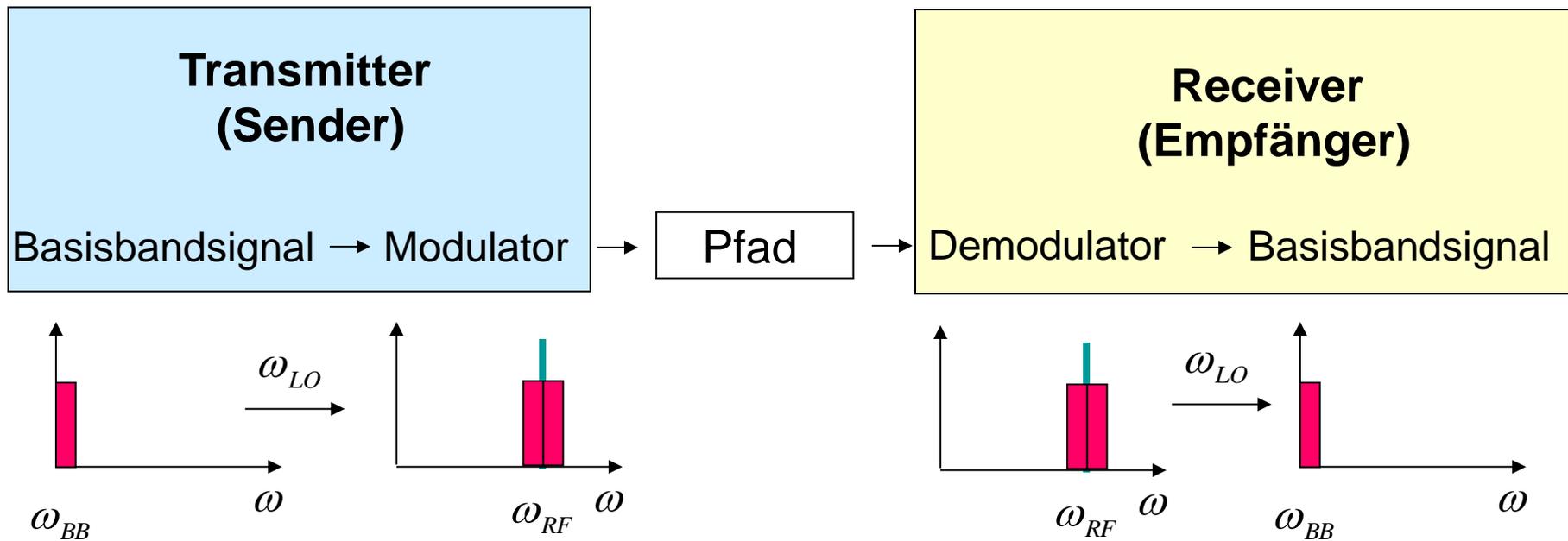


Überblick über Mixer



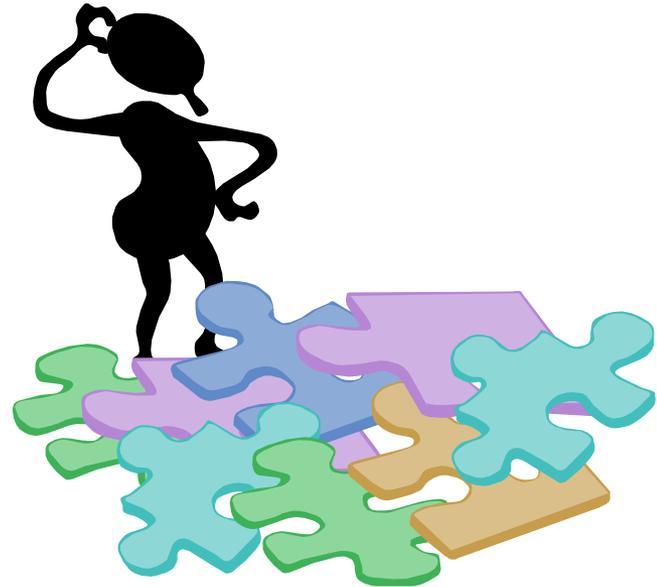
Roland Pfeiffer
12. Vorlesung

Design eines Mixers

Ihr Chef stellt Ihnen die Aufgabe, einen Down-Conversion-Mixer als zweite Stufe im Empfängerpfad zu designen. Idealerweise sollte diesselbe Mixerstruktur auch als Up-Conversion-Mixer im Sendepfad verwendet werden.

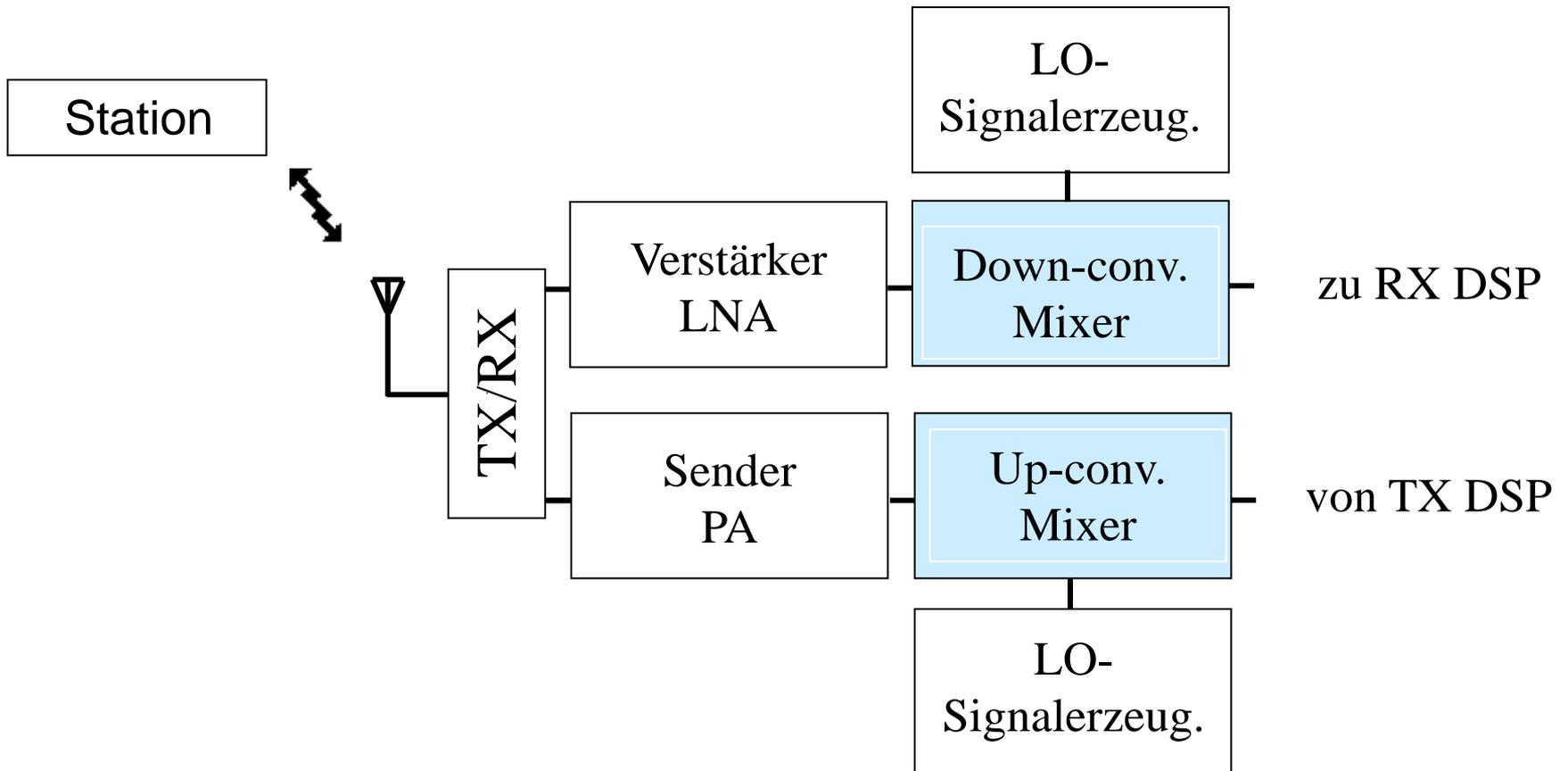
Ihre Aufgabe:

- Aufgaben des Mixers
 - Meßgrößen des Mixers
 - verschiedene Mixer-Architekturen aus Veröffentlichungen
- ⇒ Design eines Mixers



Aufgaben eines Mixers

Mixer als Stufe des Hochfrequenz-Empfängers und -Senders



Prinzip eines Mixers

Mathematische Beschreibung (allgemein, ideal):

Multiplikation der Eingänge:

$$(A_{F1} \cdot \cos \omega_{F1} \cdot t) \cdot (A_{F2} \cdot \cos \omega_{F2} \cdot t) =$$

Ausgang:

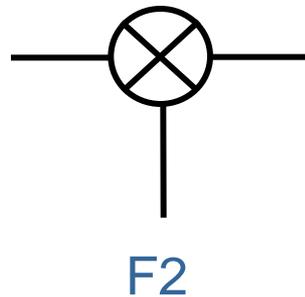
unteres
„Seitenband“

oberes
„Seitenband“

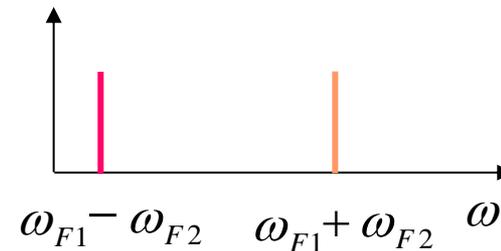
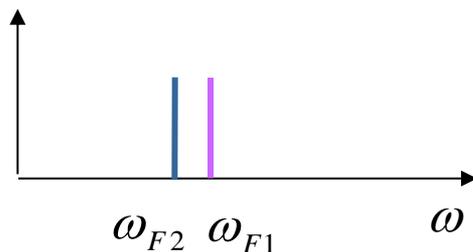
$$\frac{A_{F1} \cdot A_{F2}}{2} \cdot [\cos(\omega_{F1} - \omega_{F2}) \cdot t + \cos(\omega_{F1} + \omega_{F2}) \cdot t]$$

Eingang (ideal):

F1

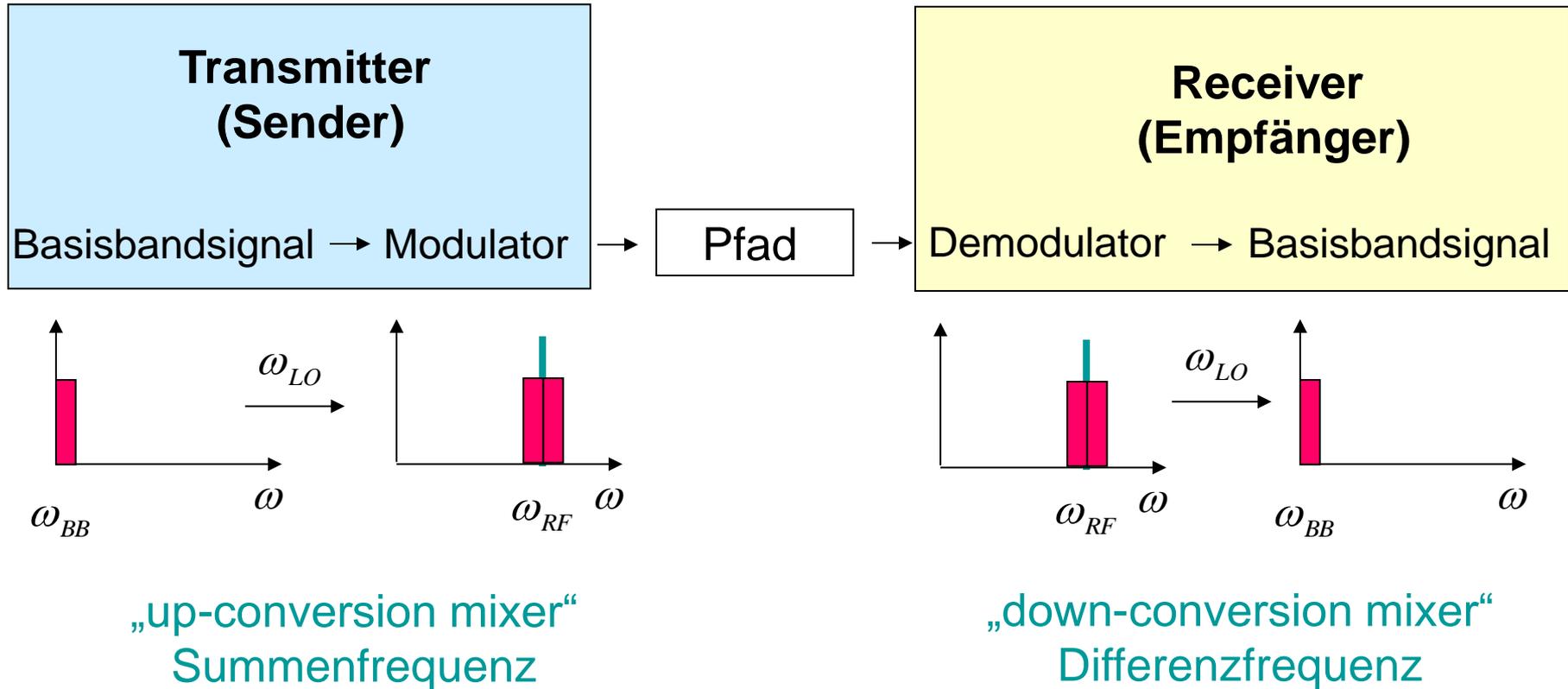


Ausgang (ideal):



Prinzip eines Mixers

Anwendung eines Mixers :



Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

Ein Mixer soll

- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden

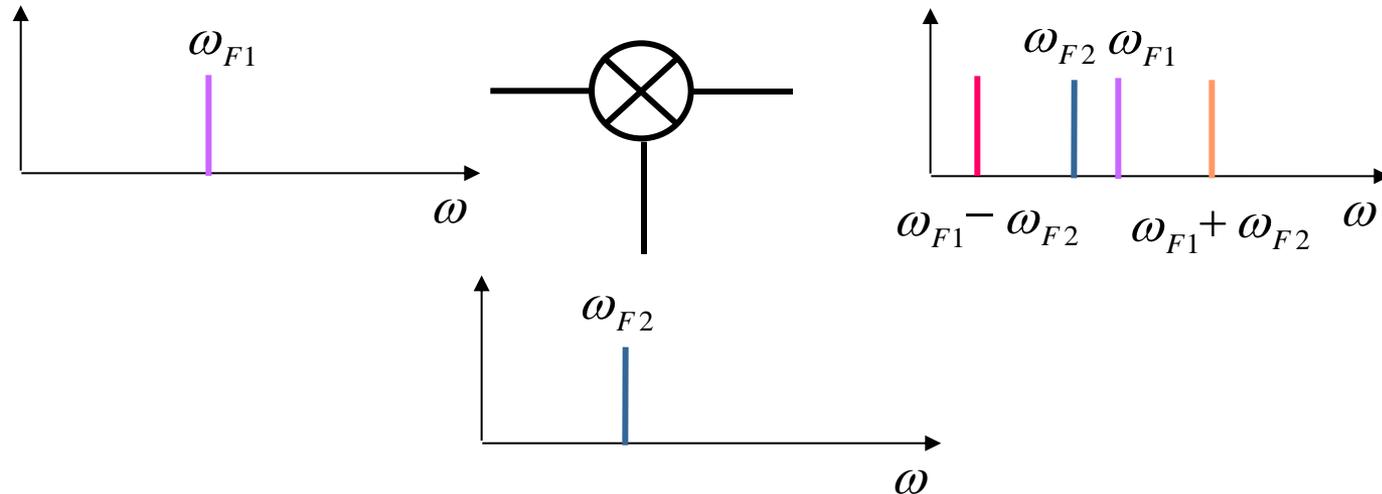
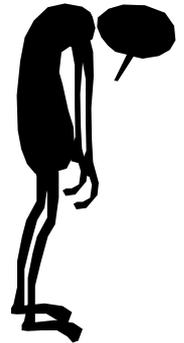
Meßgröße: „Balancing“ von Mixern

Balancing eines Mixers

Balancing von Mixern:

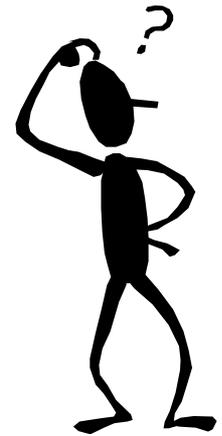
Ausgangssignal „unbalanced“:

beide zu mischenden Frequenzen



Schaltungstechnik: beide Mischsignale single-ended am Eingang

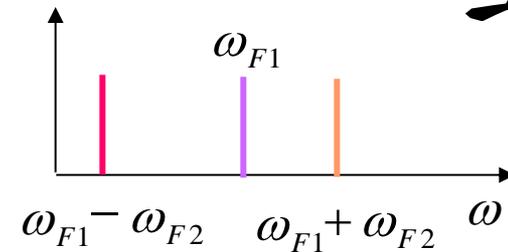
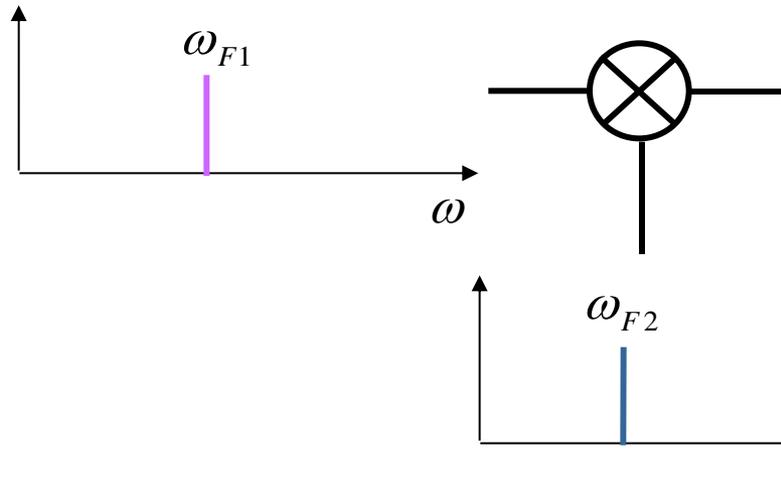
Balancing eines Mixers



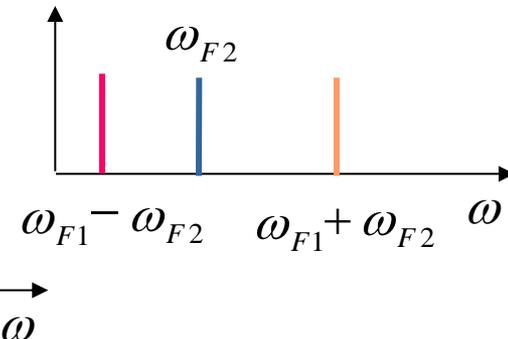
Balancing von Mixern:

Ausgangssignal „single-balanced“:

eine zu mischenden Frequenzen



oder



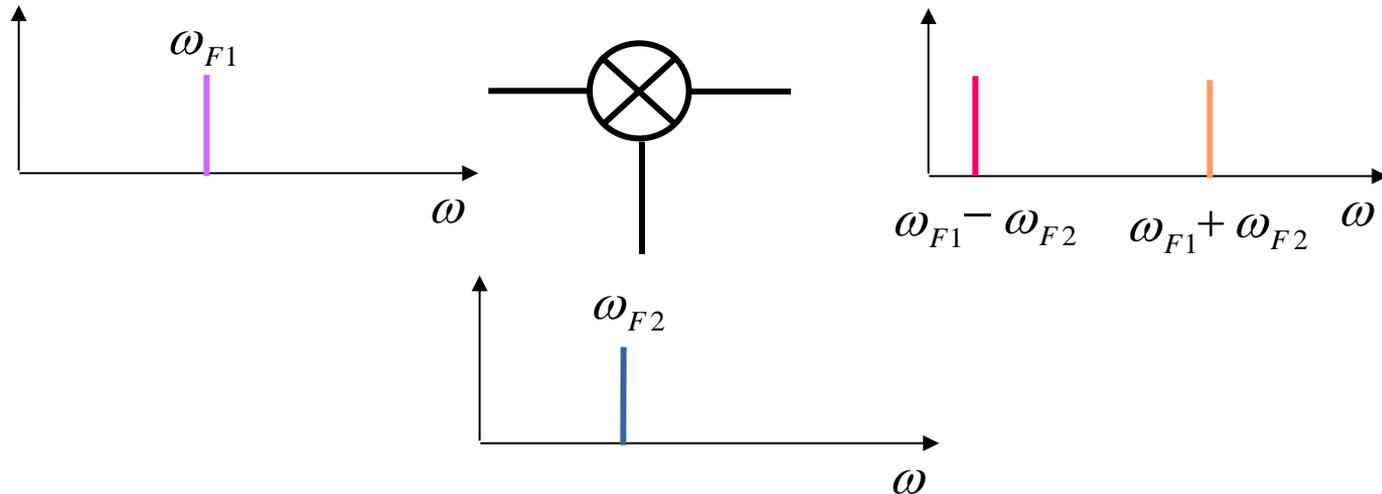
Schaltungstechnik: ein Mischsignal single-ended, das andere differentiell am Eingang („Auslöschung“)

Balancing eines Mixers

Balancing von Mixern:

Ausgangssignal „double-balanced“:

keine zu mischenden Frequenzen



Schaltungstechnik: beide Mischsignale differentiell am Eingang („Auslöschung“)

Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

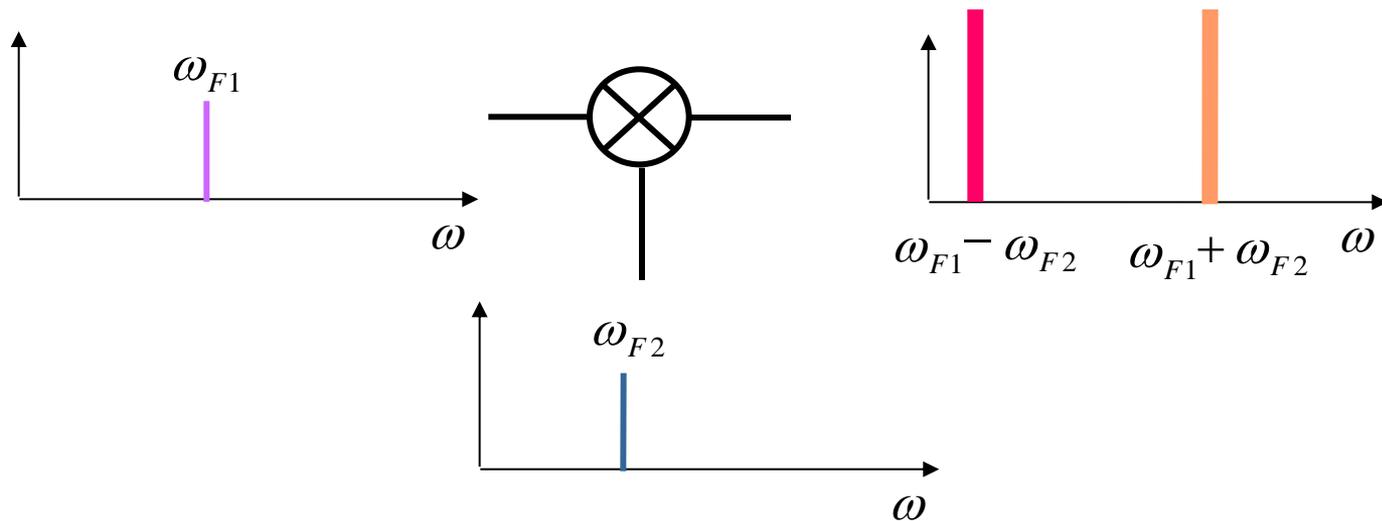
Ein Mixer soll

- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden
Meßgröße: „Balancing“ von Mixern
- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken
Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss

Aktive Mixer

Aktive Mixer: Mixer + Verstärker

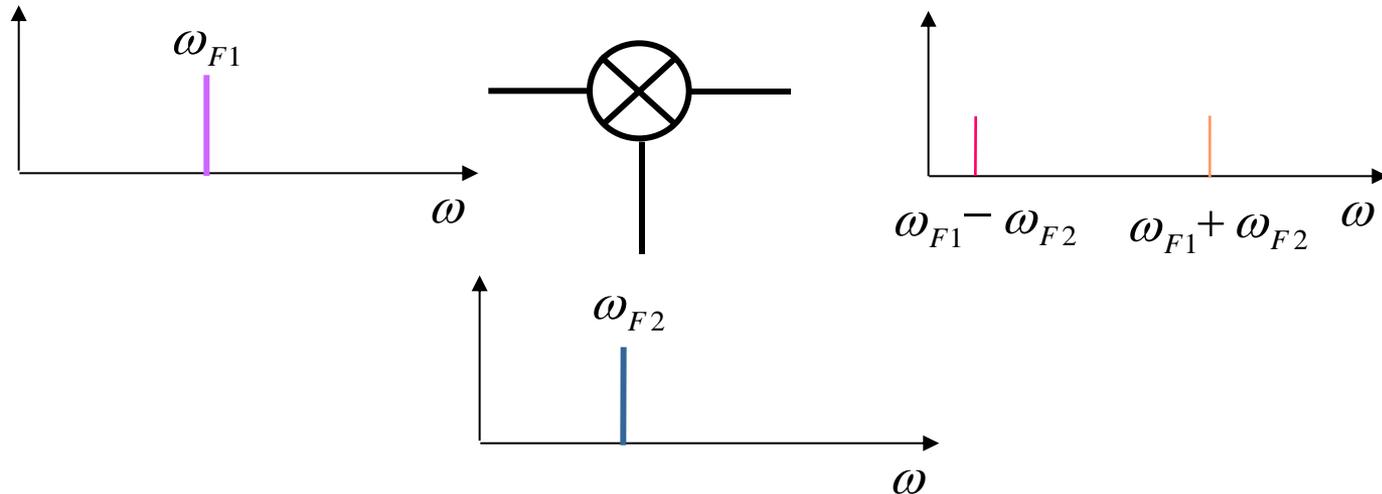
⇒ Leistungsgewinn bei der Frequenzumsetzung („conversion gain“).



Passive Mixer

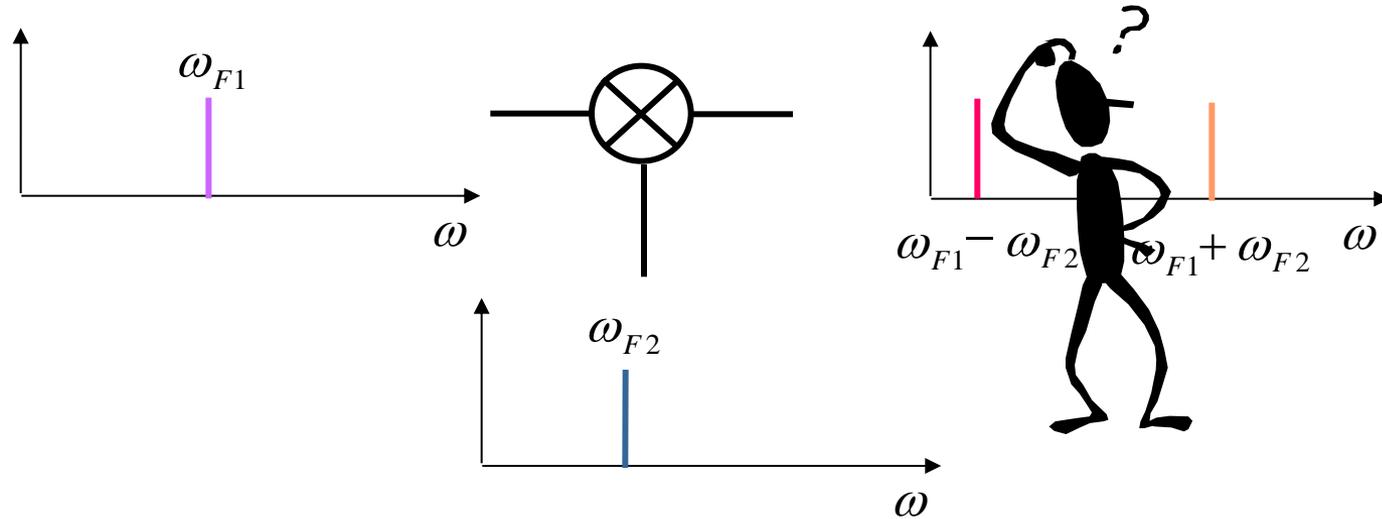
Passive Mixer: Mixer + Dämpfung

⇒ Leistungsverlust bei der Frequenzumsetzung („conversion loss“)



Conversion gain/loss

„Conversion gain/loss“ Messung:



bei konstantem LO-Signal !!

Bemerkung: Voltage (conversation) gain/loss“, „Current (conversation) gain/loss“ auch verbreitet

$$\text{Conversion gain/loss} = \frac{P_{RF}}{P_{IF/BB}}$$

Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

Ein Mixer soll

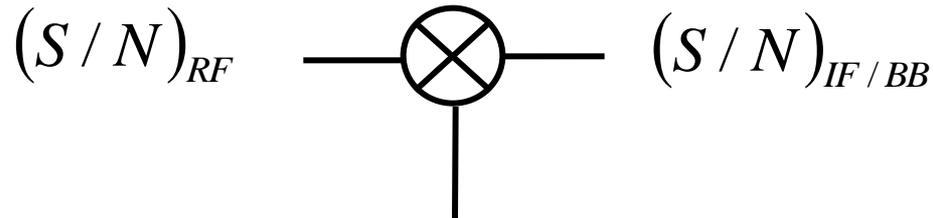
- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden
Meßgröße: „Balancing“ von Mixern
- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken
Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss
- ◆ selbst minimal rauschen
Meßgröße: Single/Double-Sideband Noise figure

Noise factor bei Mixern

„Noise factor“ bei Mixern, z.Bsp. Down-Conversion Mixer:

$$\frac{\text{Signal/Rausch-Leistungsverhältnis am RF-Eingang}}{\text{Signal/Rausch-Leistungsverhältnis am IF/BB-Ausgang}} = \frac{(S/N)_{RF}}{(S/N)_{IF/BB}}$$

bei konstantem LO-Signal !!



LO-Signal=konstant

Noise factor beschreibt, wieviel der Mixer durch sein Eigenrauschen das Signal verschlechtert \Rightarrow möglichst kleine Werte !!

Noise figure bei Mixern

Noise Figure **NF** bei Mixern, z.Bsp. Down-Conversion Mixer:

$$NF = 10 \cdot \log \frac{(S/N)_{RF}}{(S/N)_{IF/BB}} [dB]$$

2 unterschiedliche Definitionen:

„Single-Side-Band“ NF (SSB-NF)

oder

„Double-Side-Band“ NF (DSB-NF)

Unterschied zwischen beiden ??

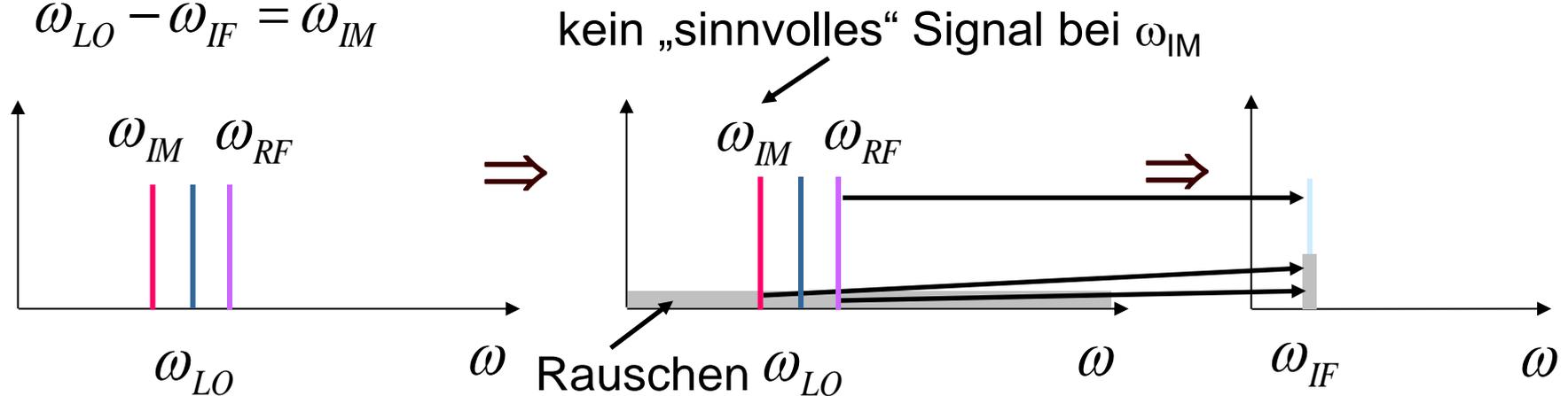


Single-Sideband Noise figure

„Single-Side-Band“ NF (SSB-NF) bei **Heterodyne**-Empfang:

$$\omega_{RF} - \omega_{LO} = \omega_{IF}$$

$$\omega_{LO} - \omega_{IF} = \omega_{IM}$$



$$\boxed{SSB}\text{-}NF = 10 \cdot \log \frac{(S_{RF} / N_{RF+IM})}{(S / N)_{IF}}$$

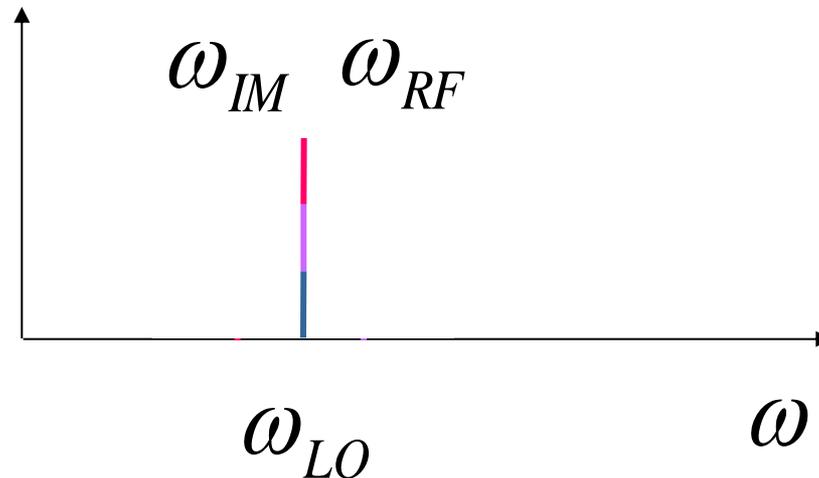
Single/Double-Sideband Noise figure

Prinzip des Homodyne-Empfangs

$$\omega_{RF} = \omega_{LO} = \omega_{IM}$$



$$\omega_{IF} = \omega_{BB} = 0 \text{ Hz} !!$$

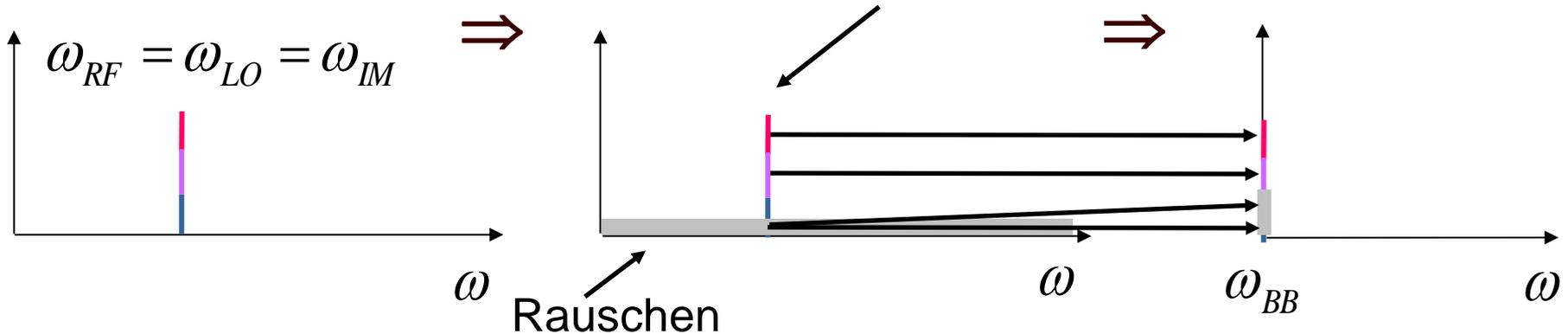


Double-Sideband Noise figure

„Double-Side-Band“ NF (DSB-NF) bei **Homodyne**-Empfang

$$\omega_{RF} = \omega_{LO} = \omega_{IM} !!$$

„sinnvolles“ Signal bei ω_{IM}



$$DSB-NF = 10 \cdot \log \frac{(S_{RF+IM} / N_{RF+IM})}{(S / N)_{IF}}$$

Single/Double-Sideband Noise figure

Fazit:

„Single-Side-Band“ NF (SSB-NF) = „Double-Side-Band“ NF (DSB-NF) +3dB

Beispiel: „rauschfreier“ Mixer (hypothetischer Fall):

$$DSB - NF = 10 \cdot \log \frac{(S_{RF+IM} / N_{RF+IM})}{(S / N)_{IF}} = 0 \text{ dB}$$

$$SSB - NF = 10 \cdot \log \frac{(S_{RF} / N_{RF+IM})}{(S / N)_{IF}} = 3 \text{ dB !!!}$$



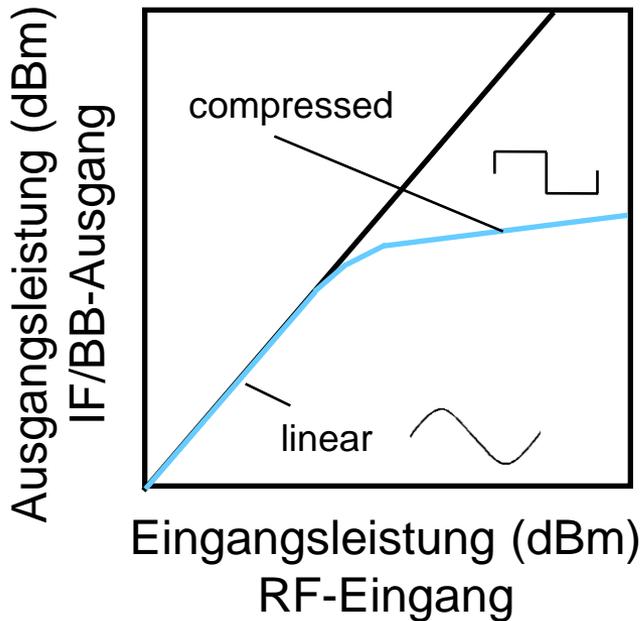
Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

Ein Mixer soll

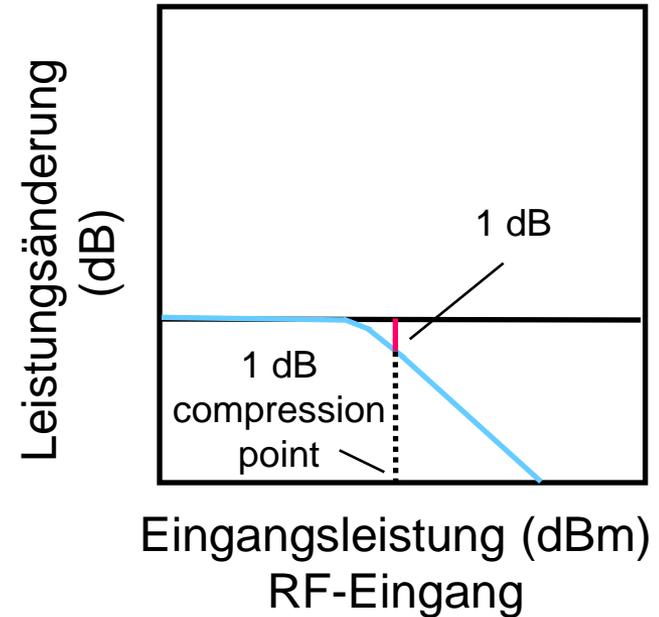
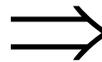
- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden
Meßgröße: „Balancing“ von Mixern
- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken
Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss
- ◆ selbst minimal rauschen
Meßgröße: Single/Double-Sideband Noise figure
- ◆ geringe Leistungsaufnahme aufweisen (insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten wie Handys)
- ◆ eine weiten “input dynamic range“ aufweisen, d.h. gute Linearität und „Trennschärfe“ besitzen
Meßgröße: 1dB-compression point, second/third-order intercept point

Linearität eines Mixers

„1dB compression point“: Angabe der Eingangsleistung, bei der die Leistungsänderung um 1dB abgesunken ist gegenüber der „conversion gain/loss“ in der „linear region“



Ausgangsleistung(dBm)/
Eingangsleistung (dBm)
=
„conversion
gain/loss(dB)“

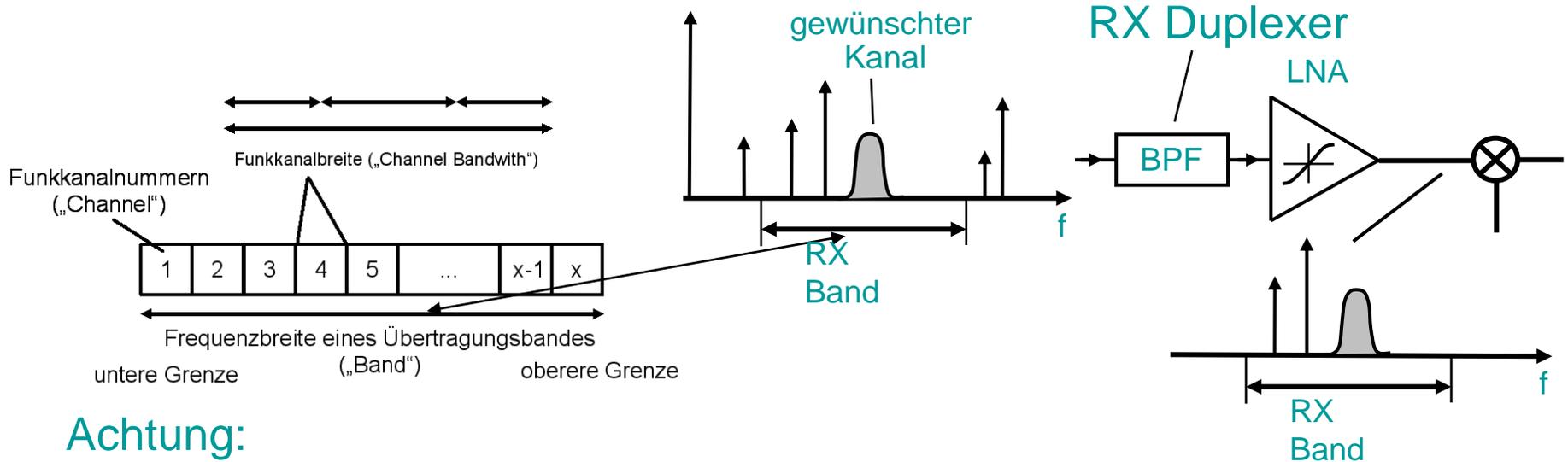


kennzeichnet die Linearität eines Mixers

„je höher der Wert, desto besser ist die Linearität“

Trennschärfe eines Mixers

Trennschärfe: der Mixer soll ein schwaches Signal auch dann linear umsetzen, wenn zwei starke Signale mit ungefähr derselben Frequenz vorhanden ist (sonst: „blocking“, „cross-modulation“).



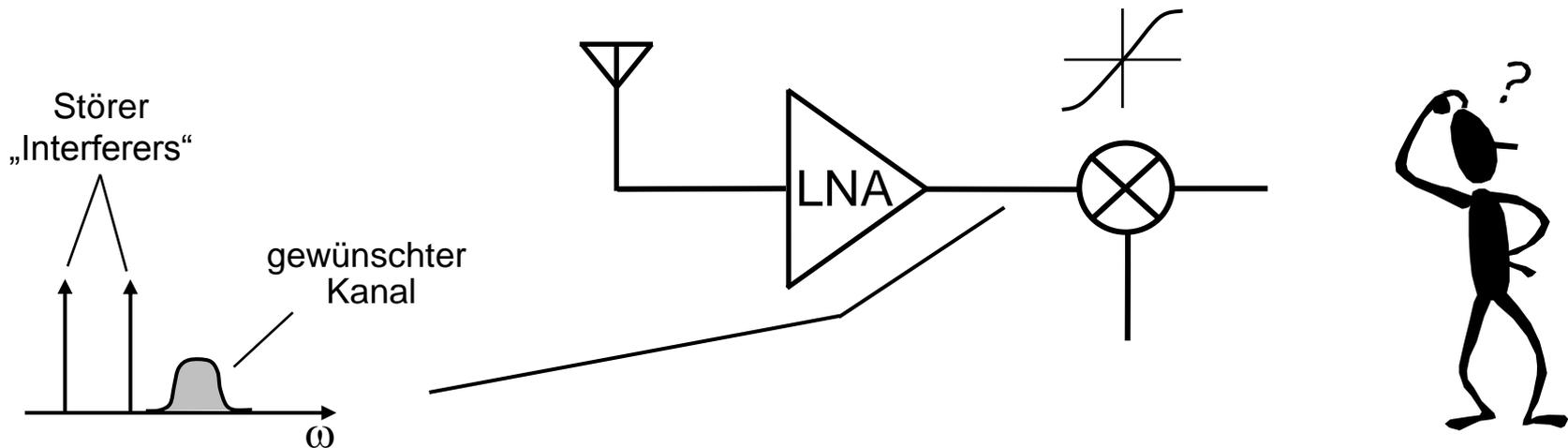
Achtung:

nur „out-of-band“, nicht aber die „in-band“, aber „out-of-channel“ werden durch den RX-Duplexer unterdrückt \Rightarrow wichtig für Mixer !!

Trennschärfe eines Mixers

Trennschärfe: der Mixer soll ein schwaches Signal auch dann umsetzen, wenn zwei starke Signale mit ungefähr derselben Frequenz vorhanden sind

Beispiel: Down-Conversion Mixer



Ursache für begrenzte Trennschärfe:

Nichtlinearitäten zum Beispiel in der Transistorkennlinie

Achtung: Frequenzumsetzung

Meßgröße:

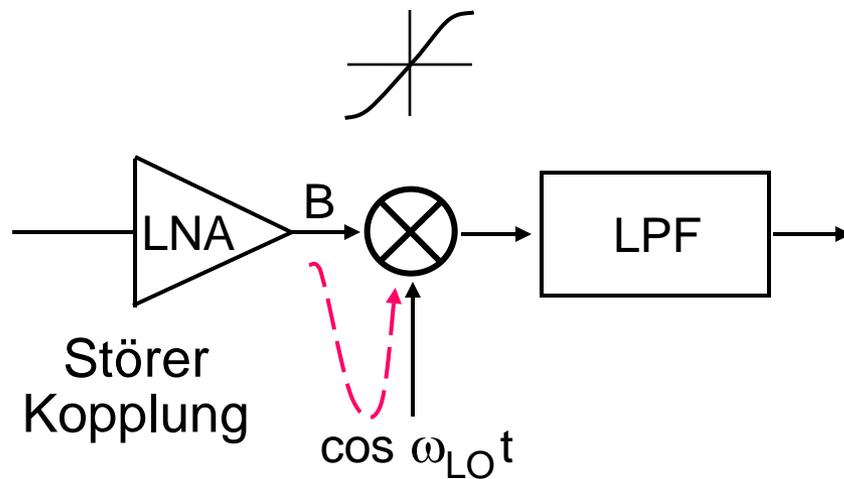
„Third-order intercept point (IP3)“, („Second-order intercept point (IP2)“)

Second-order intercept point (IP2)

Zusätzlich bei homodyne Empfänger:

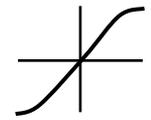
Meßgröße: „Second-order intercept point (IP2)“

Nichtlinearitäten im Mixer erzeugen im RF-Signal Anteile, die durch „self-mixing“ einen DC-Offset hervorrufen



„self-mixing“ \Rightarrow DC-Offset

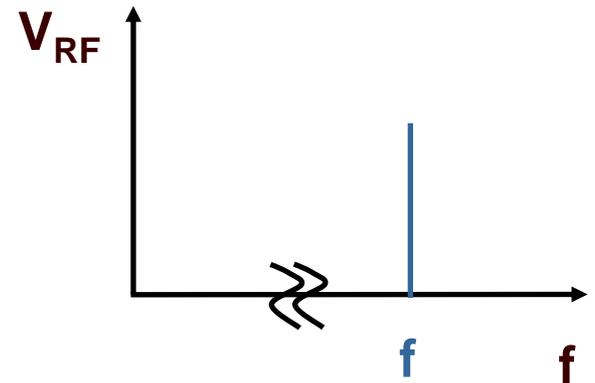
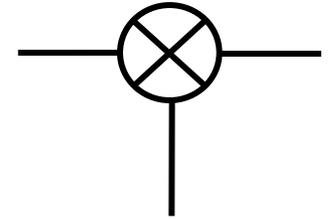
Second-order intercept point (IP2)



Meßbedingungen:

- ◆ ein Signal als RF-Eingangssignal:

$$V_{RF} = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$



- ◆ Effektives Eingangssignal darstellbar als

$$V_{RF,eff} \approx c_0 + c_1 \cdot V_{RF} + \boxed{c_2 \cdot V_{RF}^2} + c_3 \cdot V_{RF}^3 + \dots$$

Second-order intercept point (IP2)

Messung „Second-order intercept point“:

Frage: welche Signalanteile tauchen im Basisband-Ausgangssignal auf
(d.h.werden durch den Mixer geleitet)

unter Beachtung der Rechenregeln für Cosinusschwingungen z.Bsp.

$$V_{RF}^2 = \{A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)\}^2 = \frac{A^2}{2} \cdot (1 + \cos(2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot f \cdot t))$$

DC-Anteil

Second-order intercept point (IP2)

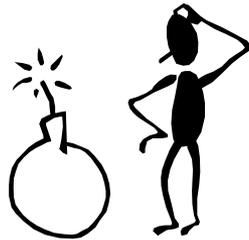
Messung „Second-order intercept point“:

Frage: welche Signalanteile tauchen im Basisband-Ausgangssignal auf (d.h. werden durch den Mixer geleitet)?

$$c_2 \cdot \frac{A^2}{2} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot f)$$

nicht interessierend, da außerhalb des Basisbandes !!

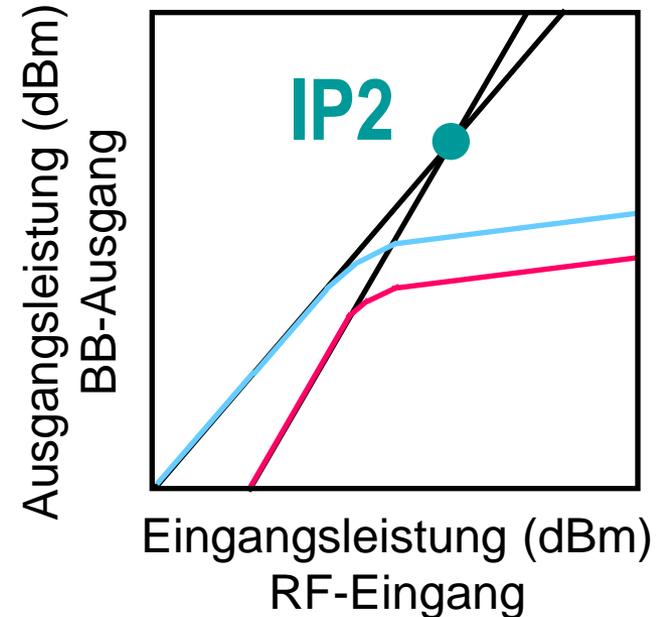
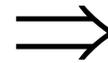
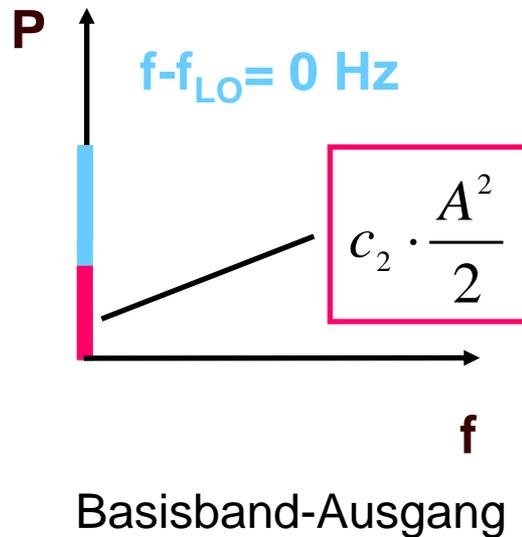
$$c_2 \cdot \frac{A^2}{2}$$



DC-Offset innerhalb des Basisbandes !!

Second-order intercept point (IP2)

Messung „Second order intercept point“

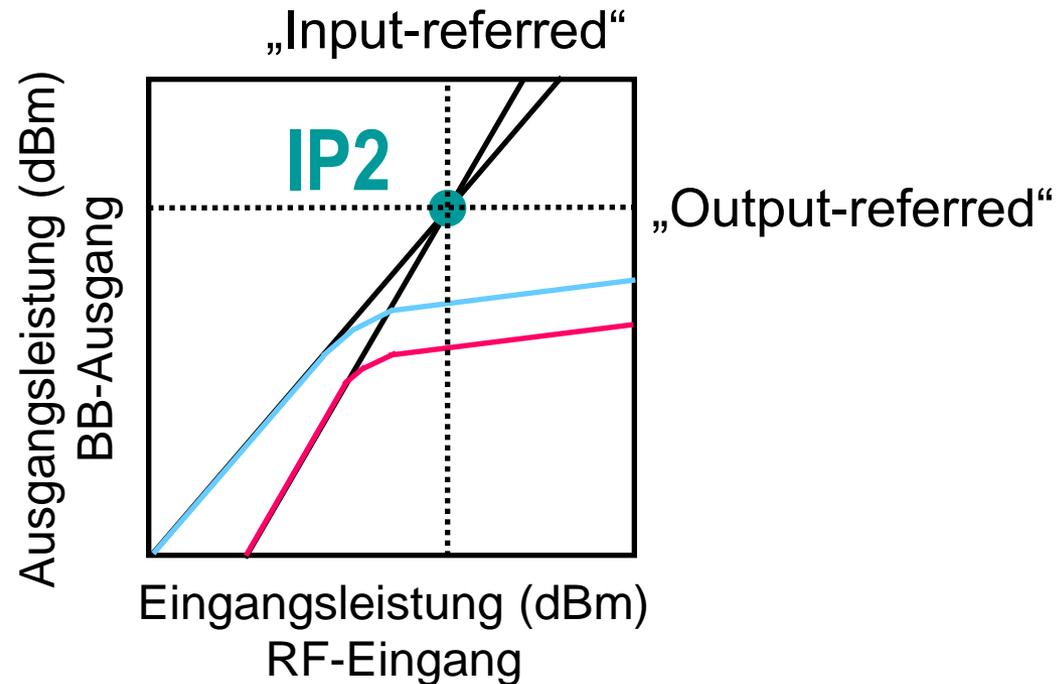


Bemerkungen zu Eingangs-/Ausgangsleistungs-Diagramm:

- wegen Angabe in dBm: zweifache Steigung Linie $2f$ gegenüber f
 - ⇒ erzwingener Schnittpunkt !!
- aus Messungen extrapoliert

Second-order intercept point (IP2)

Messung „Second order intercept point“:
Input-referred oder output-referred IP2



Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

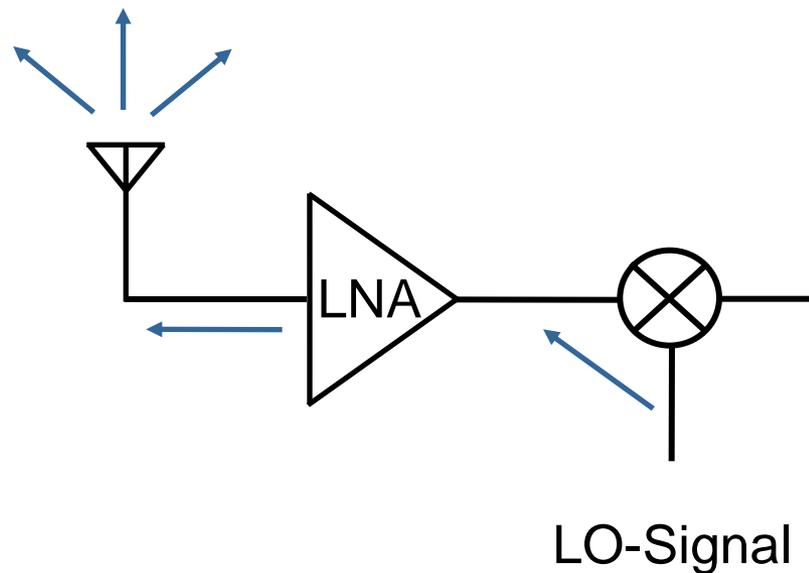
Ein Mixer soll

- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden
Meßgröße: „Balancing“ von Mixern
- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken
Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss
- ◆ selbst minimal rauschen
Meßgröße: Single/Double-Sideband Noise figure
- ◆ geringe Leistungsaufnahme aufweisen (insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten wie Handys)
- ◆ eine weiten “input dynamic range“ aufweisen, d.h. gute Linearität und „Trennschärfe“ besitzen
Meßgröße: 1dB-compression point, second/third-order intercept point
- ◆ eine Isolation zwischen Eingängen und Ausgang aufweisen
Meßgröße: Port-to-Port Isolation/Feedthrough

Isolation

Isolation zwischen RF- und LO-Eingang:

Begründung: ein starkes LO-Signal kann bei ungenügender LO/RF-Isolation (und ungenügender LNA-Rückwärts-Isolation) über die Antenne abstrahlen

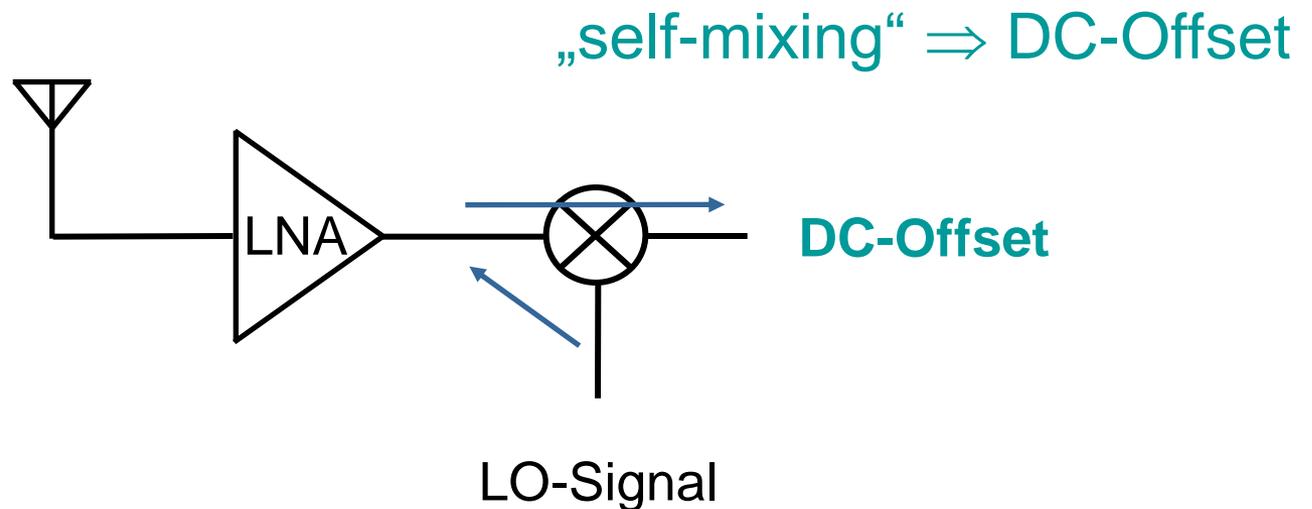


Isolation

Isolation zwischen den Eingängen sowie dem Ausgang

für homodyne Empfänger:

ein starkes LO-Signal kann bei nicht genügender LO/RF-Isolation mit sich selbst gemischt werden \Rightarrow DC-Offset

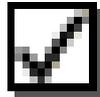


Design eines Mixers

Ihr Chef stellt Ihnen die Aufgabe, einen Down-Conversion-Mixer als zweite Stufe im Empfängerpfad zu designen. Idealerweise sollte diesselbe Mixerstruktur auch als Up-Conversion-Mixer im Sendepfad verwendet werden.

Ihre Aufgabe:

-Aufgaben des Mixers

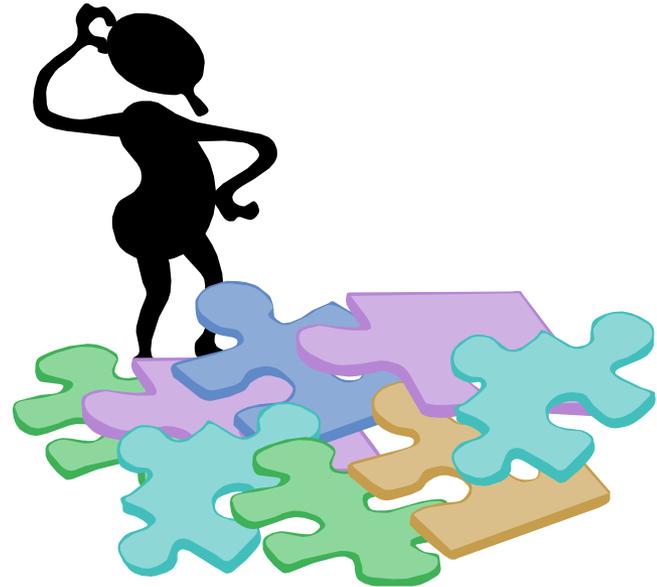


-Meßgrößen des Mixers



-verschiedene Mixer-Architekturen
aus Veröffentlichungen

⇒ Design eines Mixers



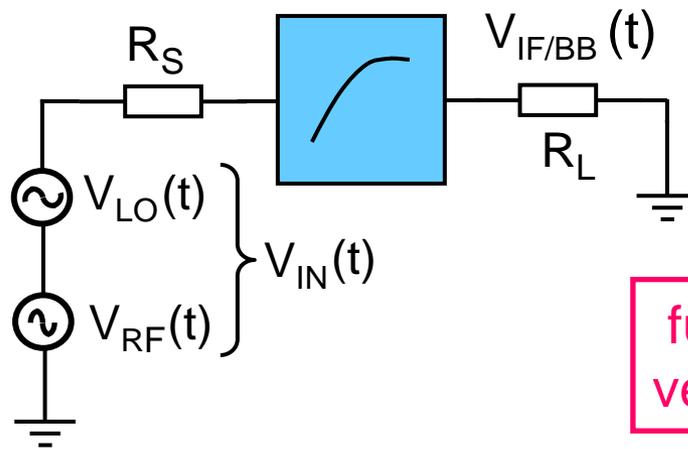
Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - Nichtlinearitäten als Mixer
 - ☞ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ☞ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ☞ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Nichtlinearitäten als Mixer

Nichtlinearitäten als Mixer

Jede Diode und Transistor weist in ihrer Übertragungskennlinie Nichtlinearitäten bei genügend hohen Eingangspegeln auf



für die Multiplikation
verantwortlich

$$V_{IF/BB} \approx c_0 + c_1 \cdot V_{IN} + c_2 \cdot V_{IN}^2 + c_3 \cdot V_{IN}^3 + \dots$$

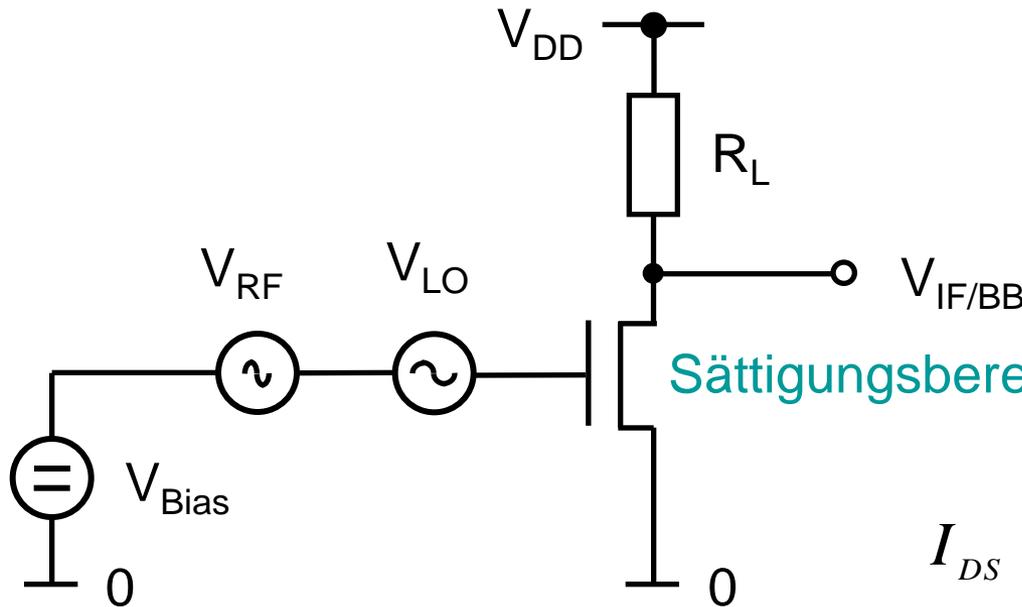
Bauteile: Diode, Bipolar-Transistor, MOS-Transistor

Nichtlinearitäten als Mixer

MOS-Transistor als Mixer

$$V_{IF/BB} = V_{DD} - R_L \cdot I_{DS} \quad I_{DS} = f(V_{IN} = U_{GS})$$
$$I_{DS} = a_0 + a_1 \cdot U_{GS} + \boxed{a_2 \cdot U_{GS}^2} + \dots$$

für die
Multiplikation
verantwortlich



Sättigungsbereich, Annahme Langkanal:

$$I_{DS} = \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2$$

Nichtlinearitäten als Mixer

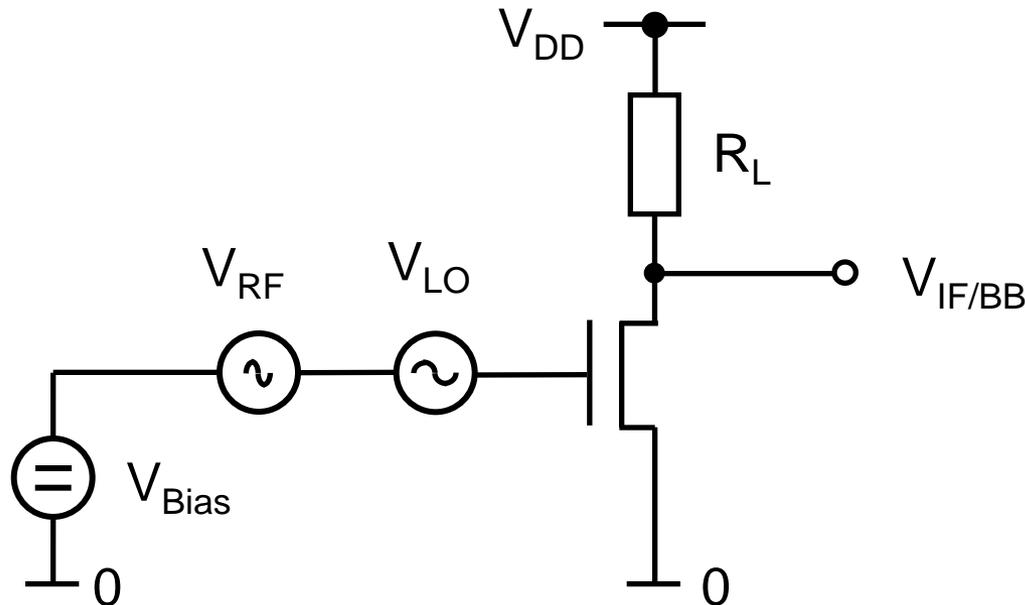
MOS-Transistor als Mixer

$$V_{IF/BB} = V_{DD} - I_{DS} \cdot R_L \qquad I_{DS} = \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TN})^2$$

Potenz-Reihe:

$$I_{DS} = \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{TN}^2 - k_N \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{TN} \cdot V_{GS} + \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{GS}^2$$

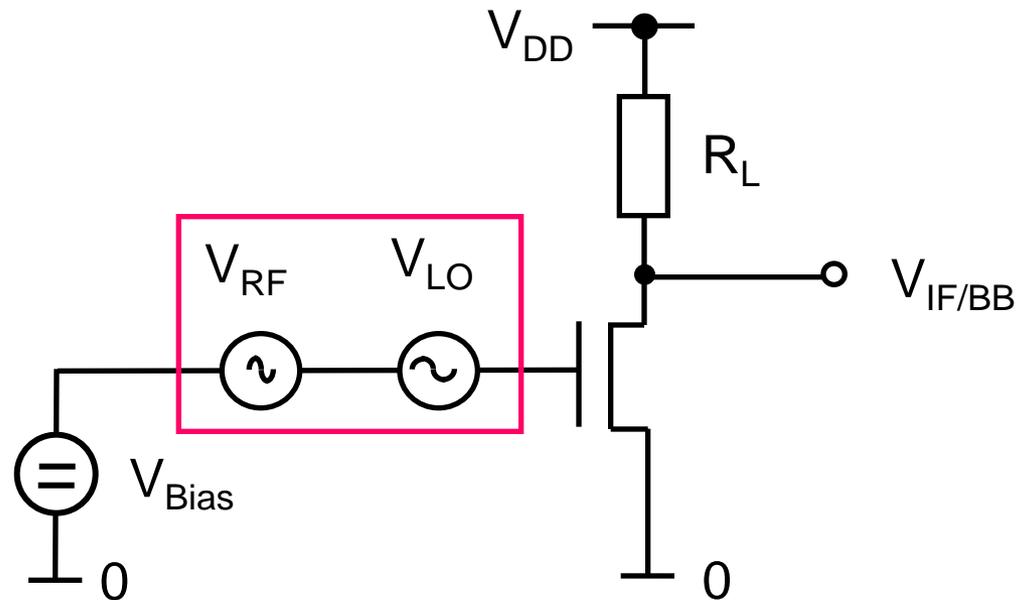
für die
Multiplikation
verantwortlich



Nichtlinearitäten als Mixer

MOS-Transistor als Mixer

Nachteil:

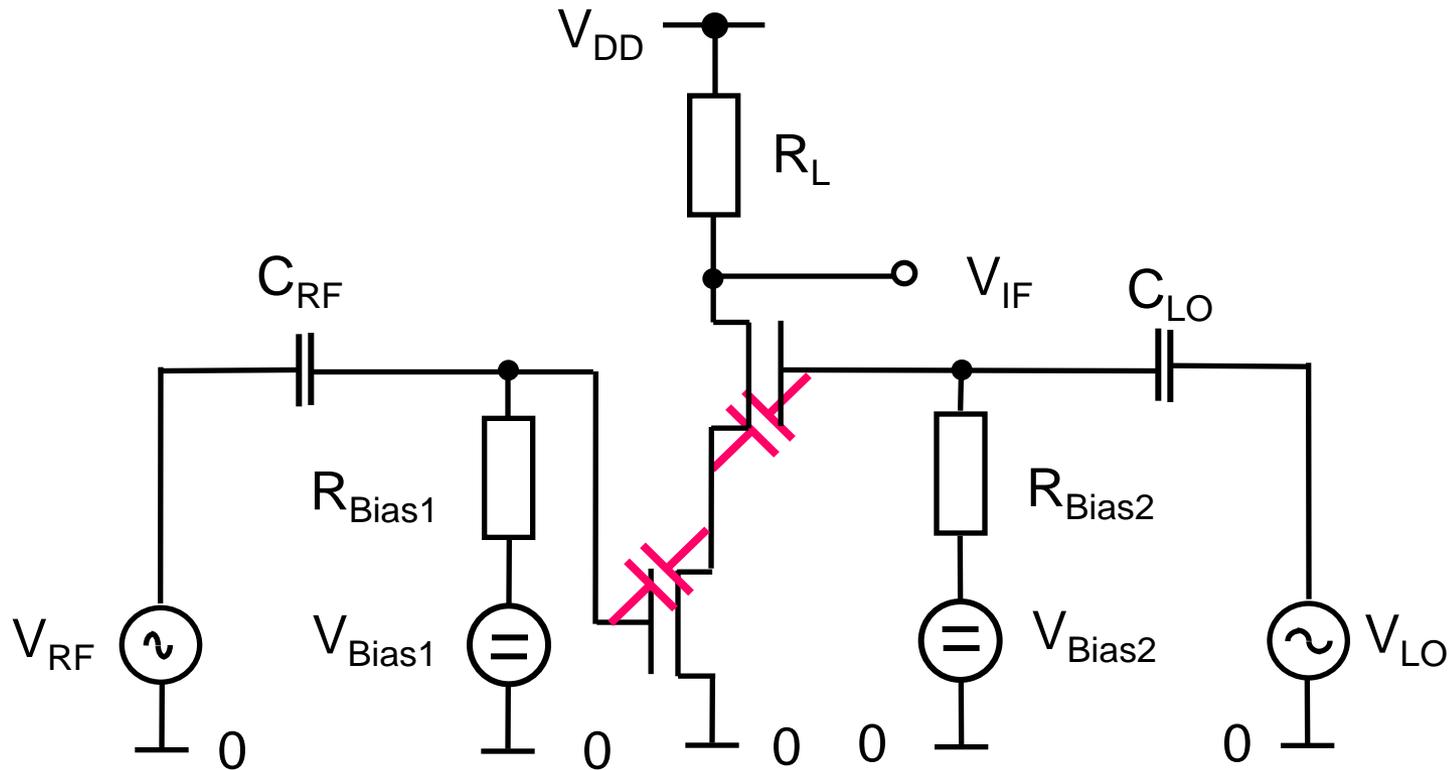


Ein einziger Eingang für LO und RF \Rightarrow keine Port-to-Port Isolation !

Alternativen?

Nichtlinearitäten als Mixer

MOS-Transistor als Mixer



Nachteil: durch C_{GS} und $C_{GD} \Rightarrow$ schlechte Port-to-Port Isolation !

Nichtlinearitäten als Mixer

Beurteilung des Nichtlinearitäten-Mixers:

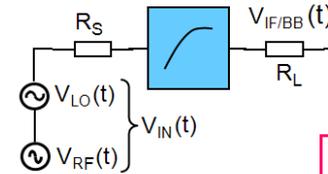
Vorteil:

- einfache Schaltungen
- aktive Mixer im MOS \Rightarrow conversion gain

Nachteil:

- unbalanced mixer
- schlechte Port-to-Port Isolation

Jede Diode und Transistor weist in ihrer Übertragungskennlinie Nichtlinearitäten bei genügend hohen Eingangspegeln auf



für die Multiplikation verantwortlich

$$V_{IF/BB} \approx c_0 + c_1 \cdot V_{IN} + c_2 \cdot V_{IN}^2 + c_3 \cdot V_{IN}^3 + \dots$$



Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ☞ Nichtlinearitäten als Mixer
 -  Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ☞ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ☞ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

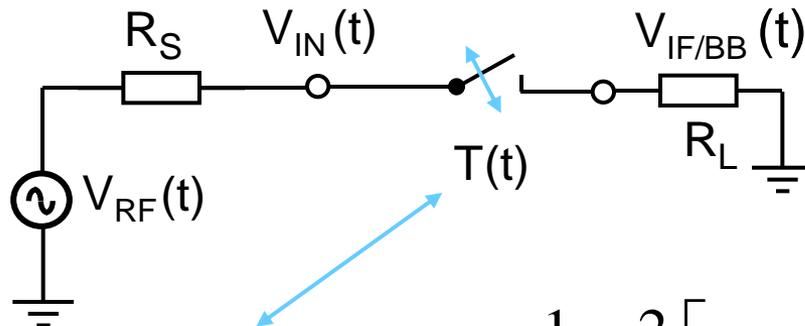
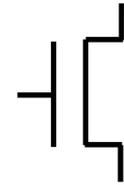
Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer:

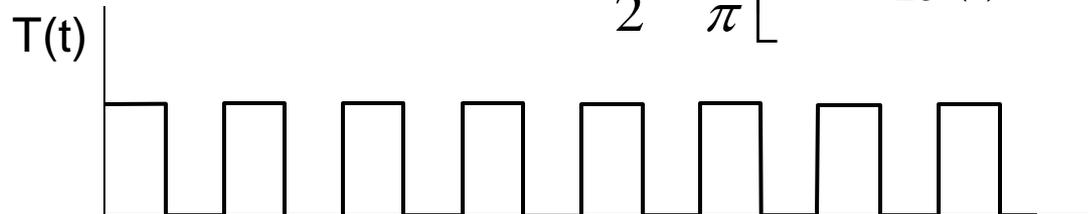
$$V_{IN}(t) = V_{RF}(t) \cdot \cos \omega_{RF}(t)$$

multiplizieren mit LO Rechteckfunktion $T(t)$

z.Bsp. Schalter =



Fourier:
$$T(t) \approx \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sin \omega_{LO}(t) + \frac{\sin 3\omega_{LO}(t)}{3} + \frac{\sin 5\omega_{LO}(t)}{5} \dots \right]$$



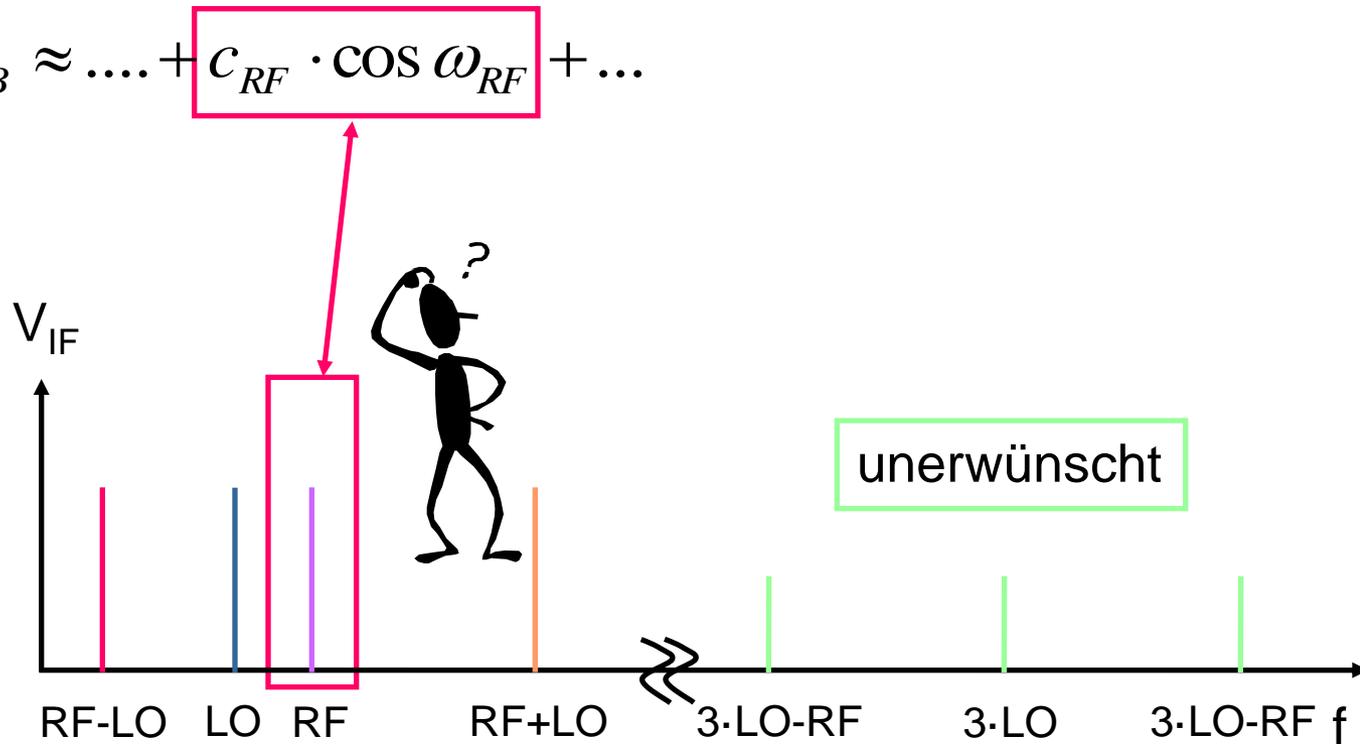
keine geraden
Harmonischen !!

Rechteckfunktion zum schnellen Öffnen/Schließen des Schalters

Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer: Simulationsergebnis am Ausgang
Beispiel: unbalanced Heterodyne-Mixer (infradyne)

$$V_{IF/BB} \approx \dots + C_{RF} \cdot \cos \omega_{RF} + \dots$$

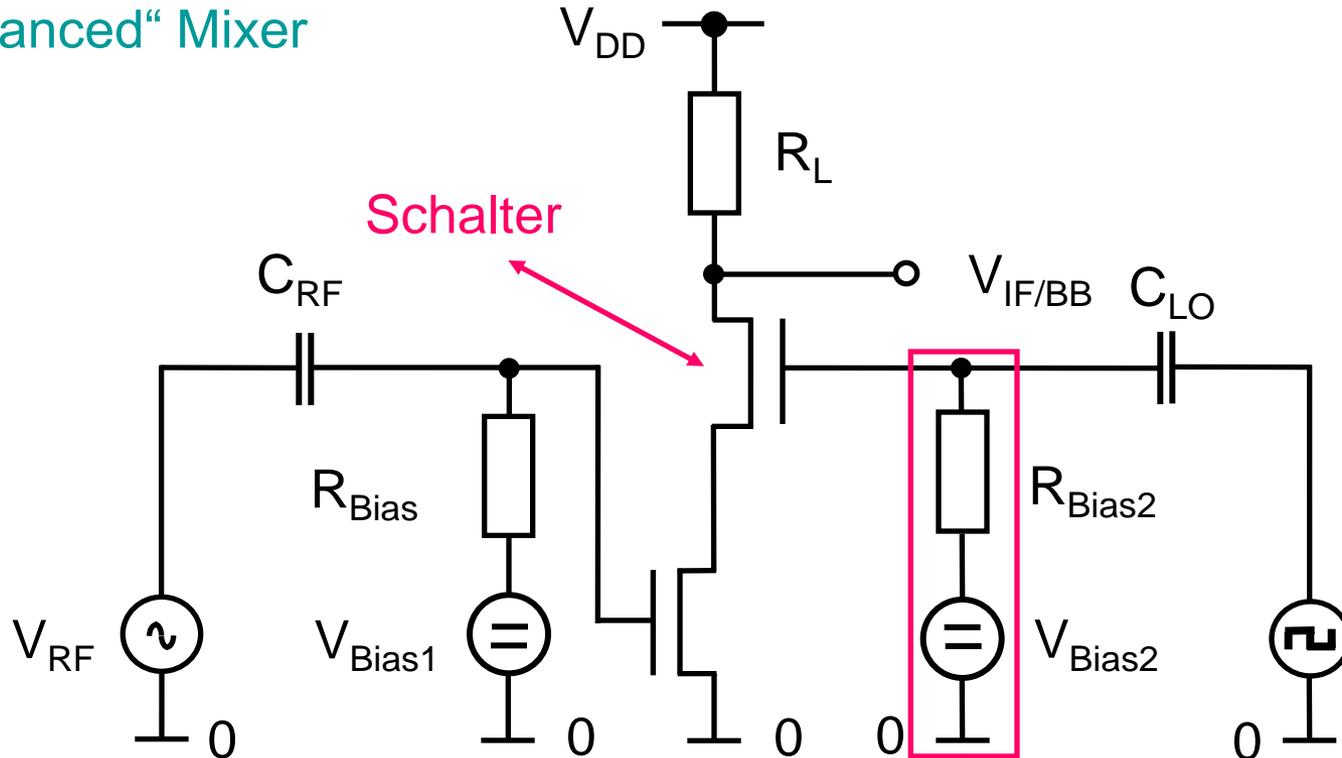


Nachteil:

-RF feedthrough wegen DC-Komponente in Fourier-Reihe

Multiplizierer-Mixer

Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren
„unbalanced“ Mixer



Nachteil:

-LO feedthrough wegen unbalanced Mixer

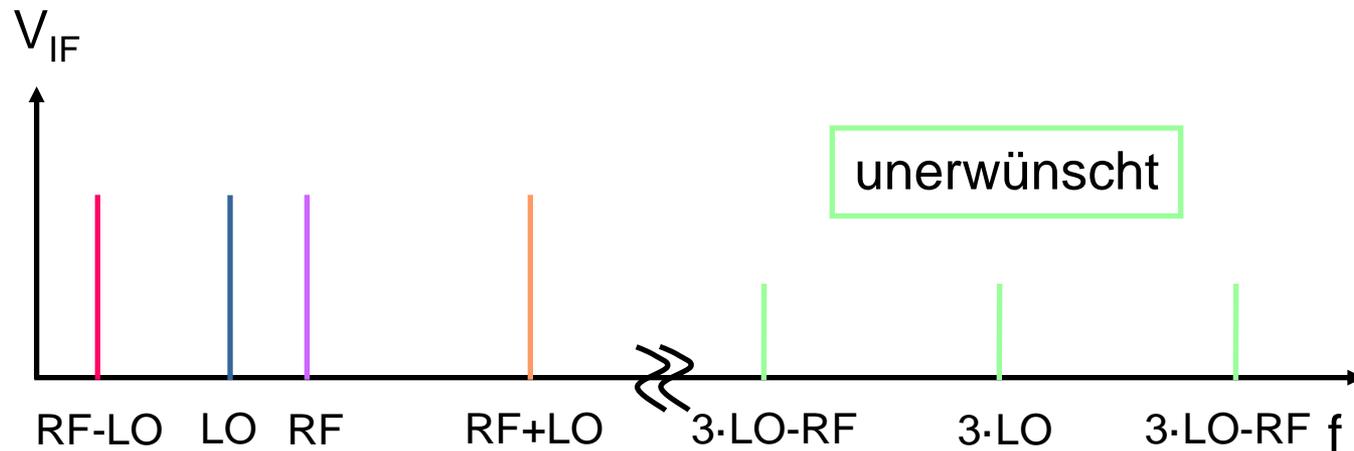
$$V_{IF/BB} \approx \dots + C_{LO} \cdot \cos \omega_{LO} + \dots$$

Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

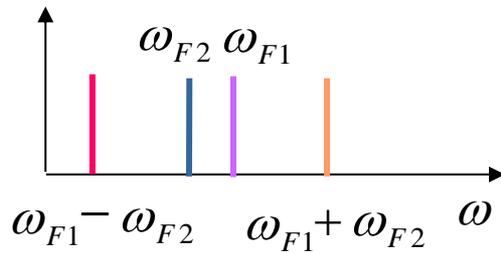
Simulationsergebnis am Ausgang

Beispiel: unbalanced Heterodyne-Mixer (infradyne)



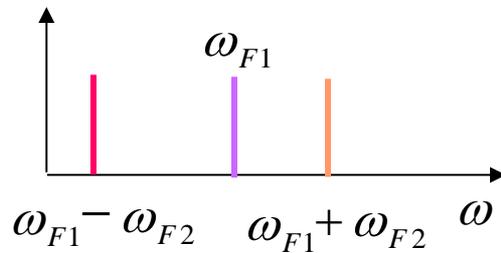
Balancing eines Mixers

-unbalanced

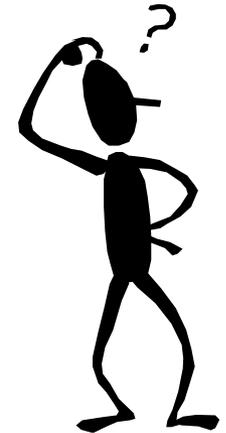
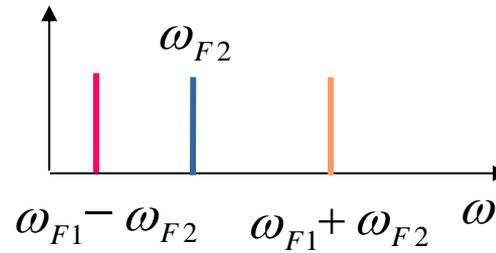


← jetziger Stand !!

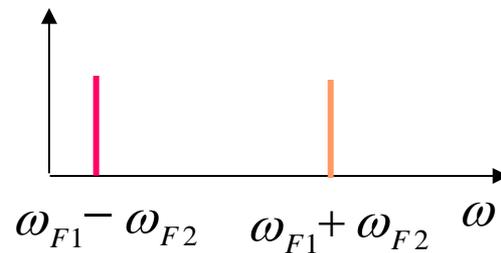
-single-balanced



oder



-double-balanced



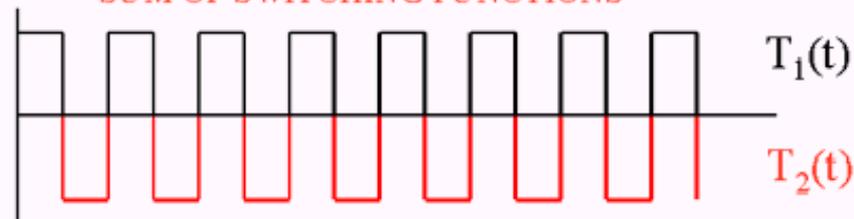
Multiplizierer-Mixer

Verbesserung des Multiplizierer-Mixers:

$$T_1(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega_{LO}t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_{LO}t) + \dots \right]$$

$$T_2(t) = -\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[\sin(\omega_{LO}t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_{LO}t) + \dots \right]$$

SUM OF SWITCHING FUNCTIONS



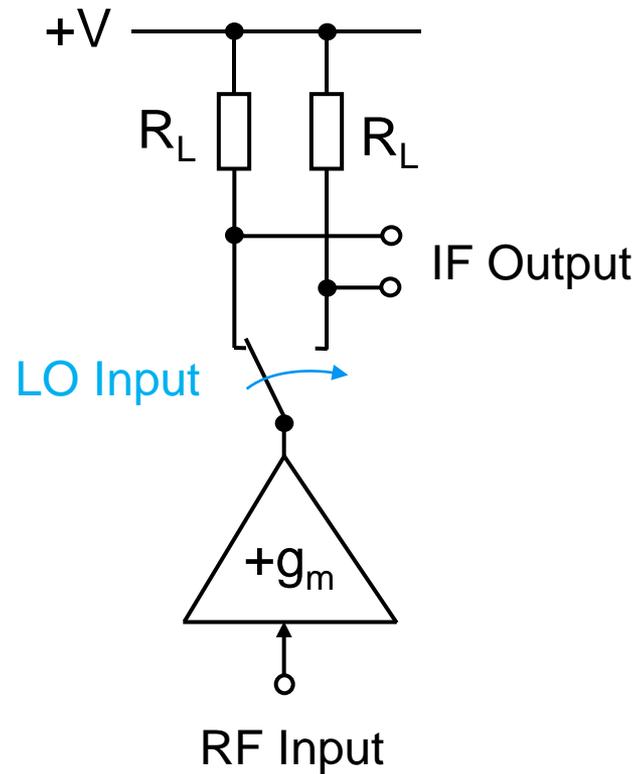
$$T(t) = T_1(t) + T_2(t)$$

kein RF feedthrough, da kein DC-Anteil in der Fourier-Reihe !!
differentielles LO-Signal \Rightarrow single-balanced Mixer



Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer: single-balanced Mixer bei LO-Bias

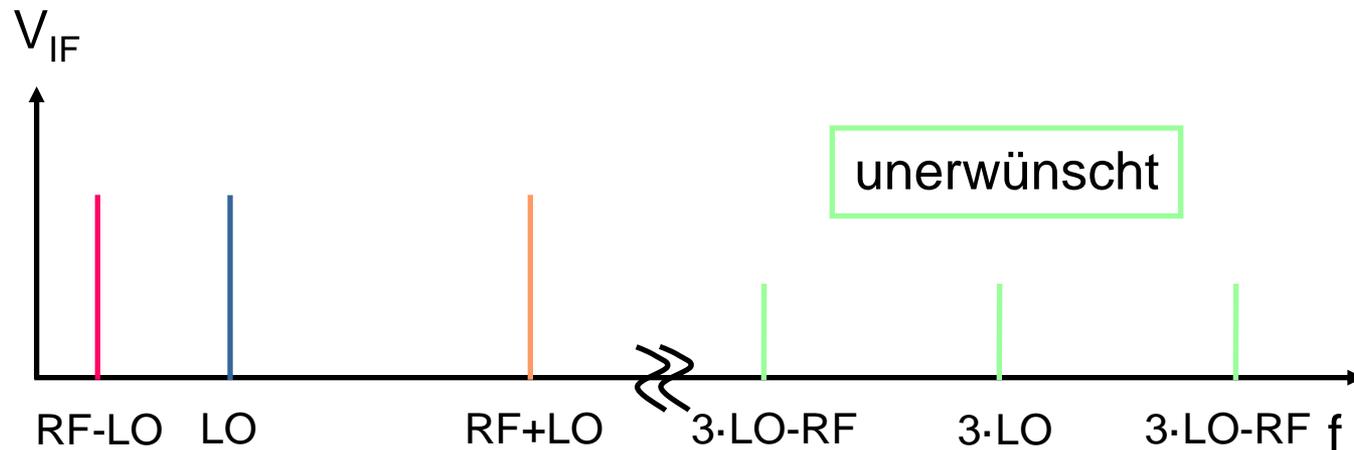


Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

Simulationsergebnis am Ausgang

single-balanced Heterodyne-Mixer (infradyne)



Nachteil:

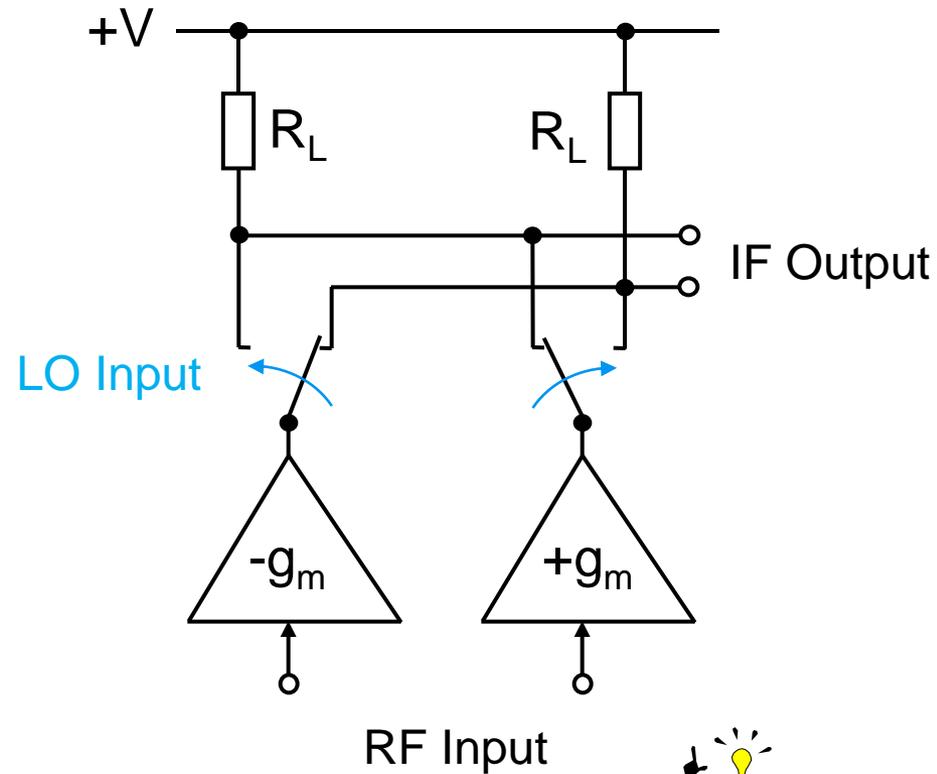
-LO feedthrough wegen single-balanced mixer

Alternative??



Multiplizierer-Mixer

Verbesserung des Multiplizierer-Mixer: double-balanced Mixer

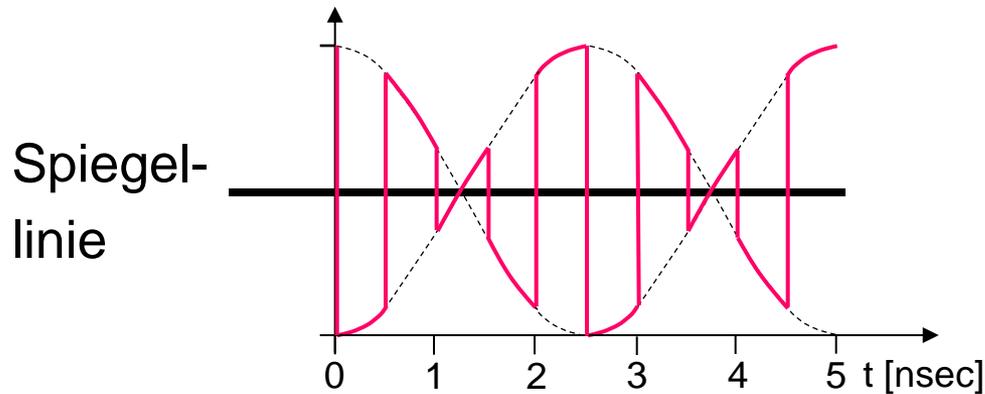


Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren:

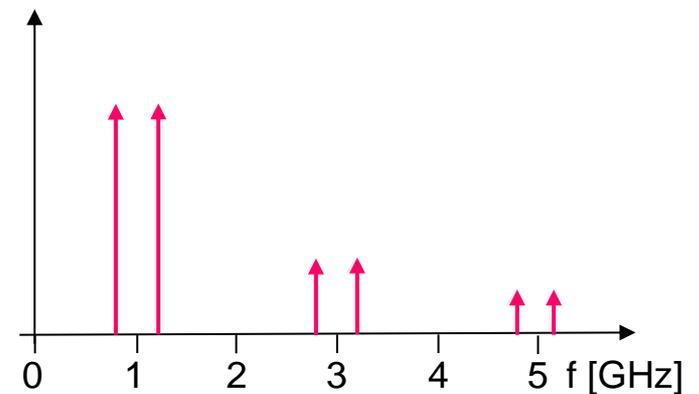
Simulationsergebnis am Ausgang (double-balanced mixer, Gilbert-Mixer)

Differentielle Ausgangsspannung



LO-Polaritätswechsel
leicht erkennbar !!

kein RF- und LO-Feedthrough !!



$$f_{\text{LO}} = 200 \text{ MHz}$$

$$f_{\text{RF}} = 1.0 \text{ GHz}$$

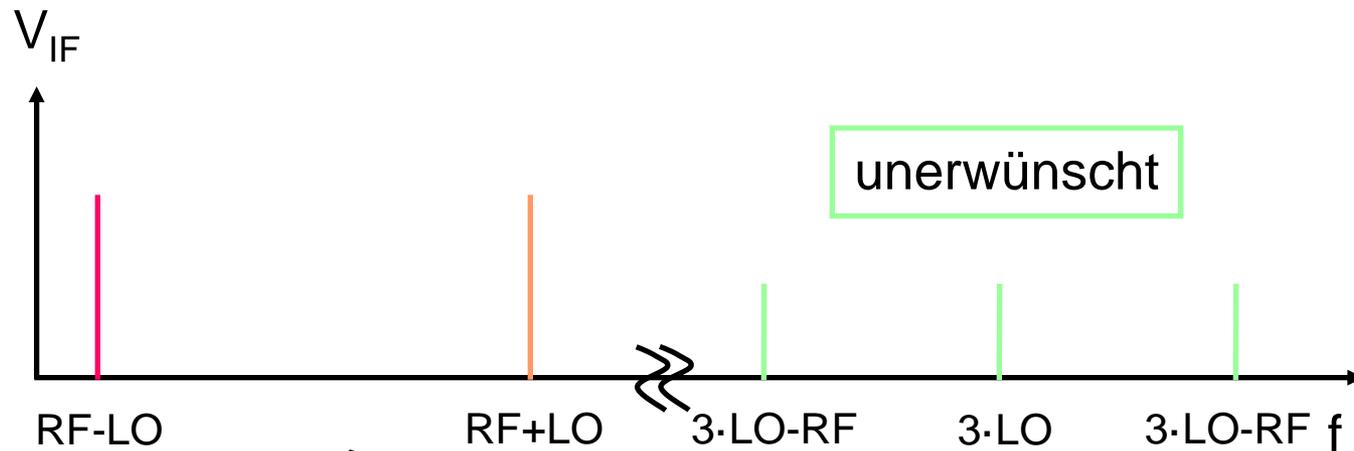
$$f_{\text{IF}} = 0.8 + 1.2 \text{ GHz}$$

Multiplizierer-Mixer

Prinzip des Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

Simulationsergebnis am Ausgang

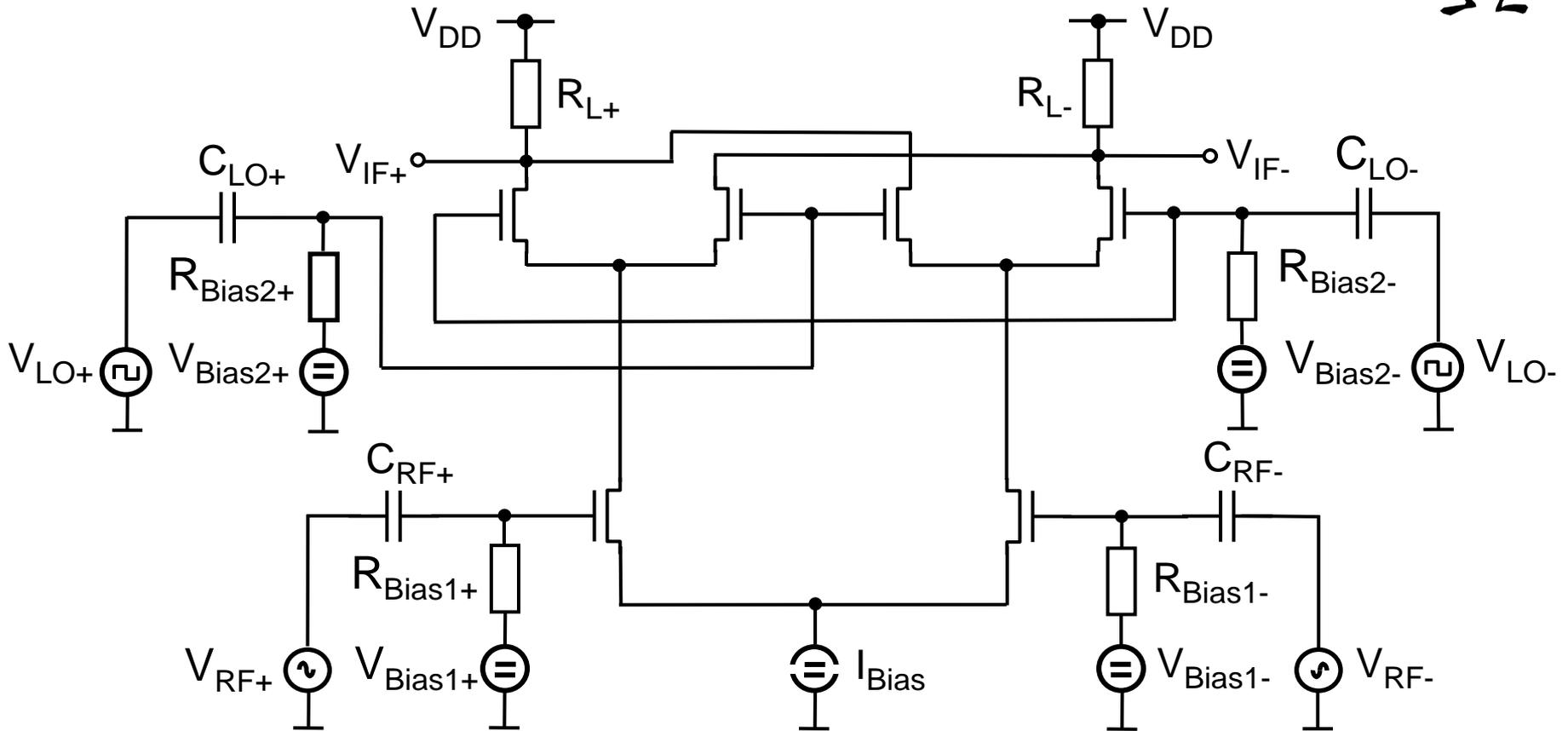
double-balanced Heterodyne-Mixer (infradyne)



Multiplizierer-Mixer

Frage: Idee zur Unterdrückung der unerwünschten Frequenzen ?

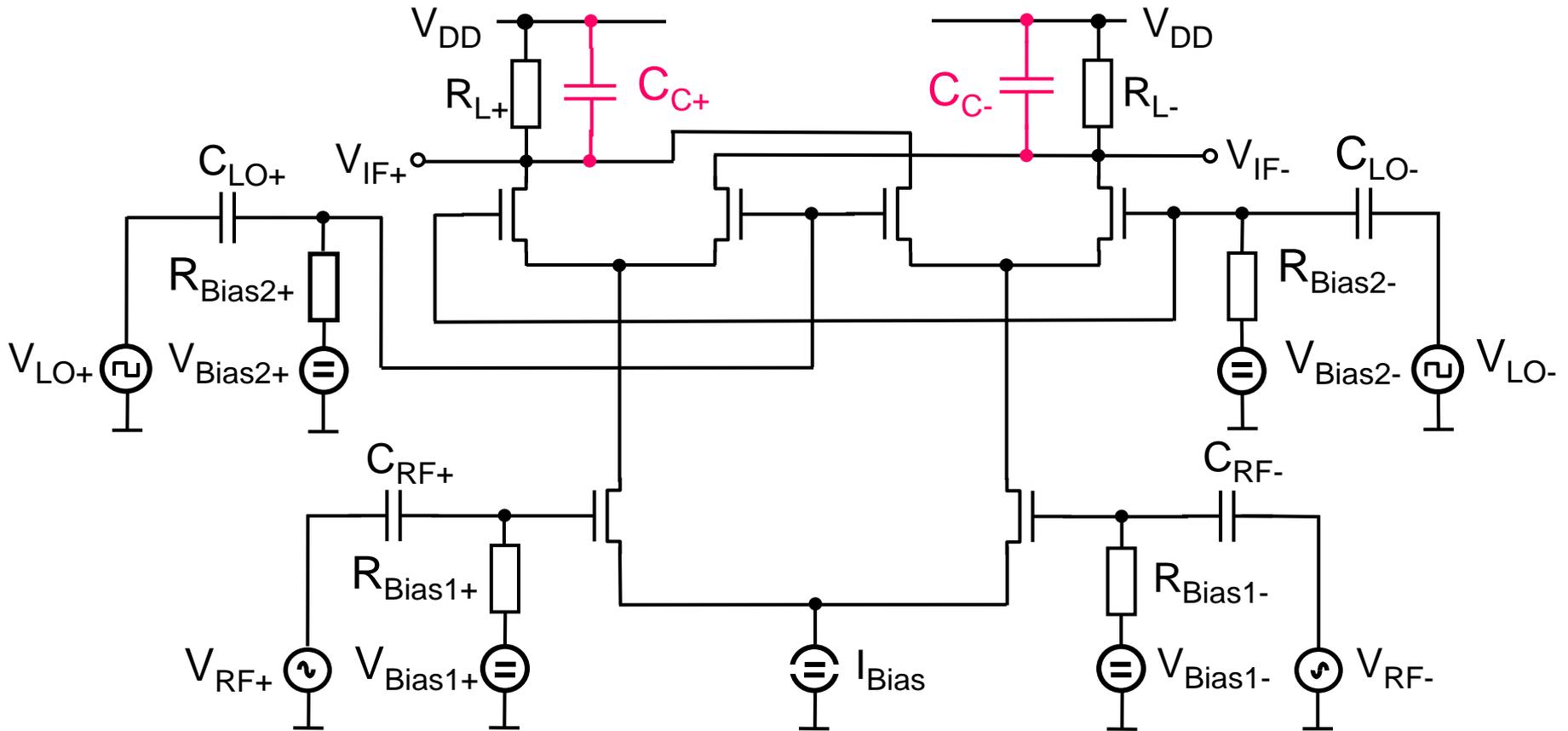
Antwort: ??



Multiplizierer-Mixer

Frage: Idee zur Unterdrückung der unerwünschten Frequenzen ?

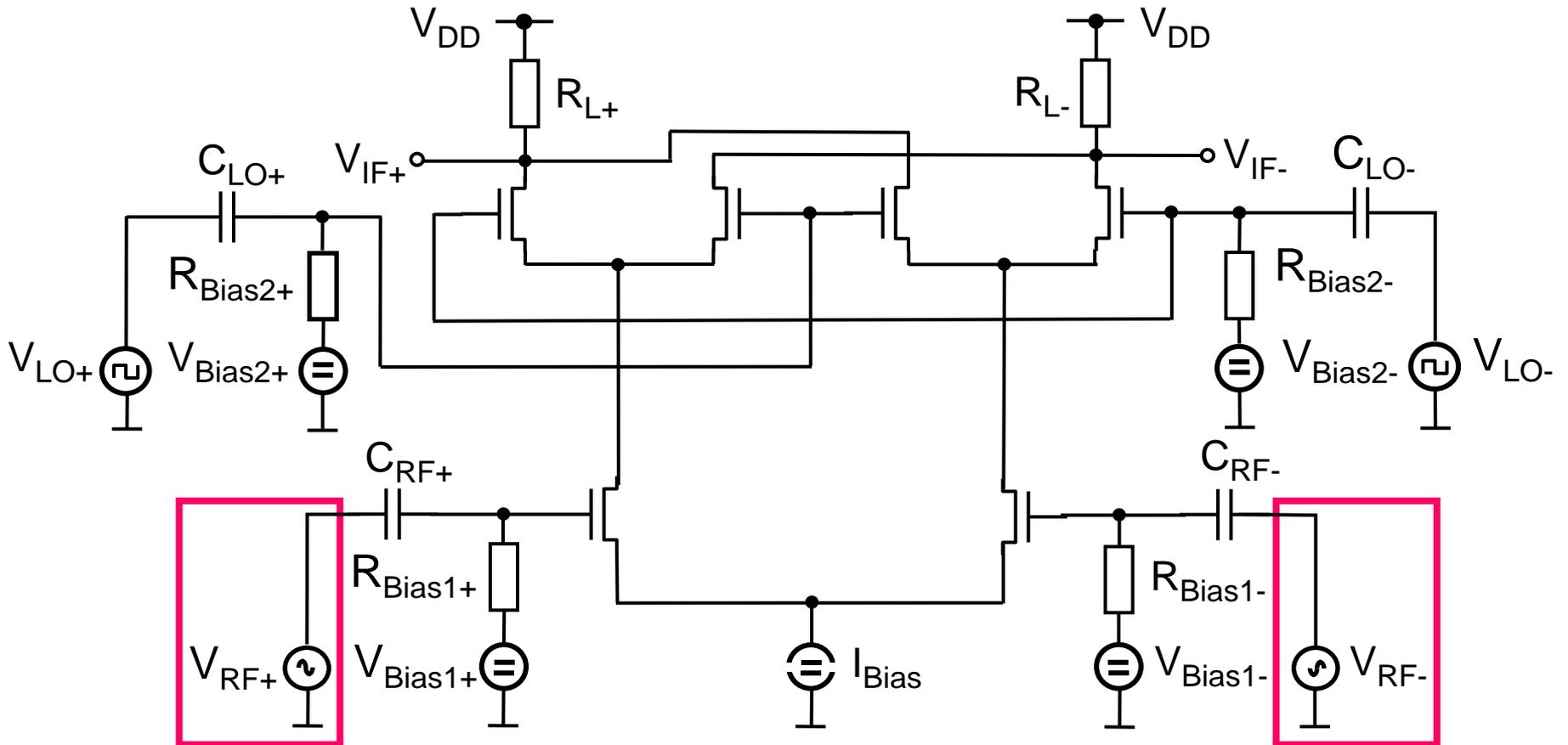
Antwort: R_L parallel $C_C \Rightarrow$ Tiefpaßverhalten



Multiplizierer-Mixer

Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

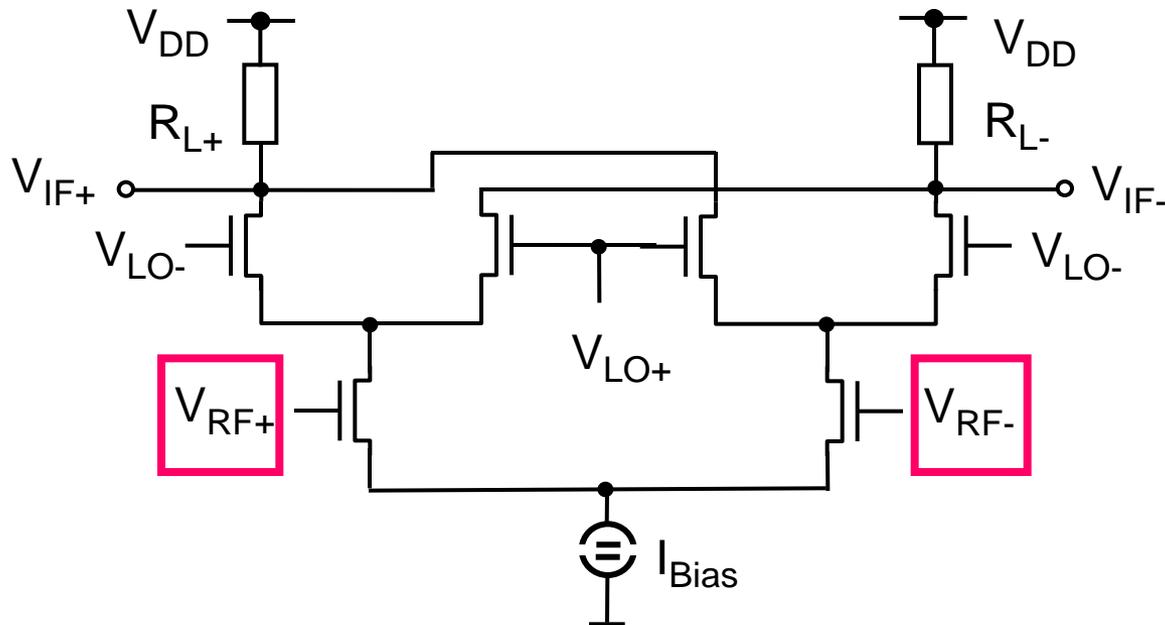
double-balanced Mixer „CMOS-Gilbert-Mixer common-source“



Multiplizierer-Mixer

Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

double-balanced Mixer „CMOS-Gilbert-Mixer **common-source**“

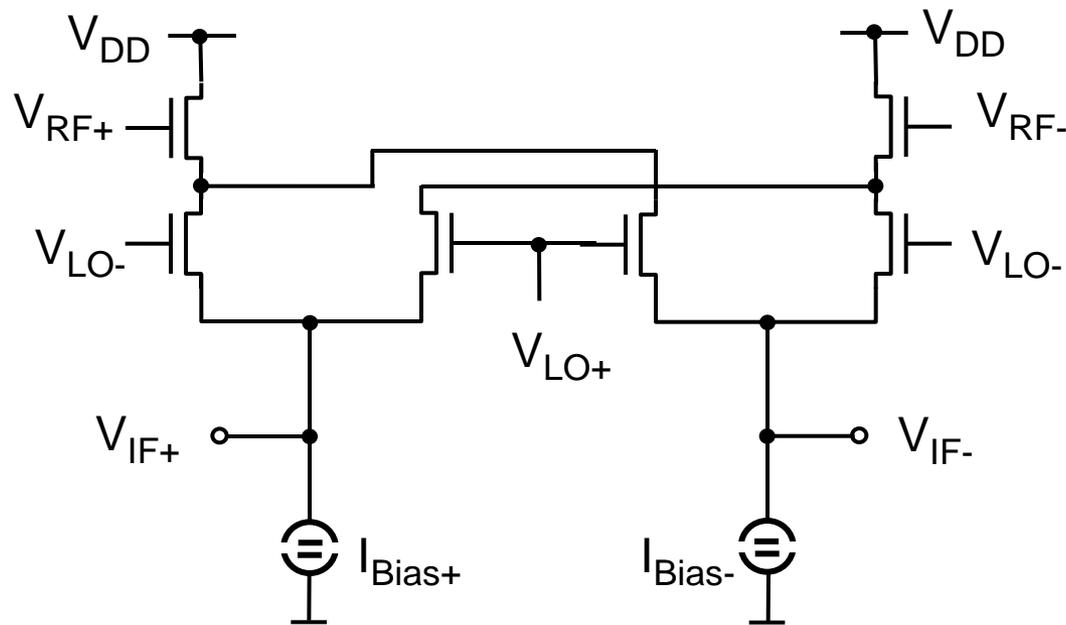


Multiplizierer-Mixer

Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

double-balanced Mixer „CMOS-Gilbert-Mixer“

Alternative:

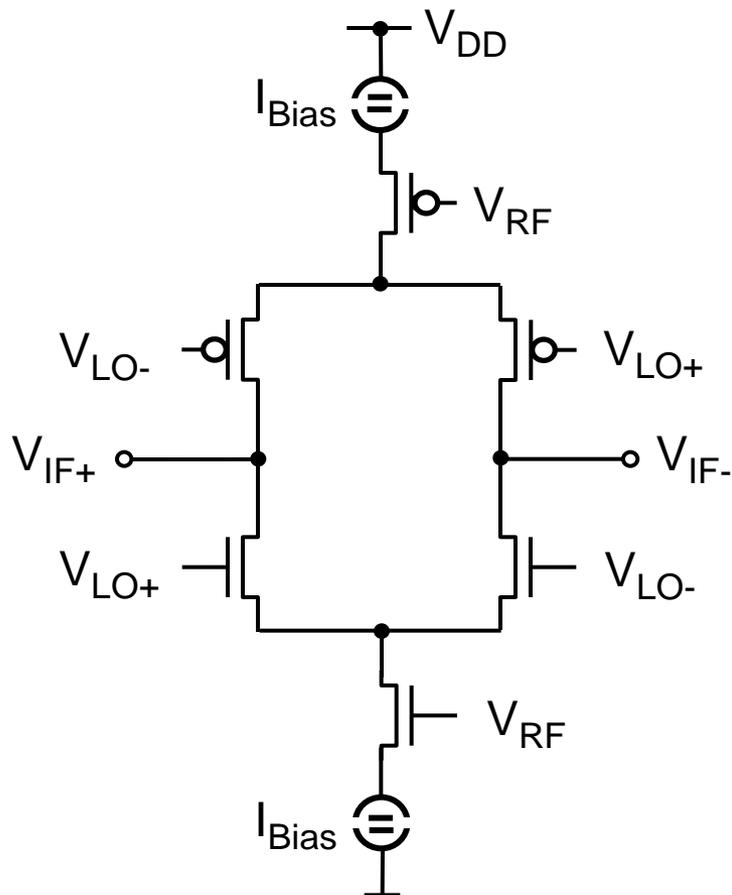


Multiplizierer-Mixer

Multiplizierer-Mixer mit MOS-Transistoren

double-balanced Mixer „CMOS-Gilbert-Mixer“

Alternative:



Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

Ein Mixer soll

- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden

Meßgröße: „Balancing“ von Mixern

- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken

Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss

- ◆ selbst minimal rauschen

Meßgröße: Single/Double-Sideband Noise figure

- ◆ geringe Leistungsaufnahme aufweisen (insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten wie Handys)

- ◆ eine weiten “input dynamic range“ aufweisen, d.h. gute Linearität und „Trennschärfe“ besitzen

Meßgröße: 1 dB-compression point, second/third-order intercept point

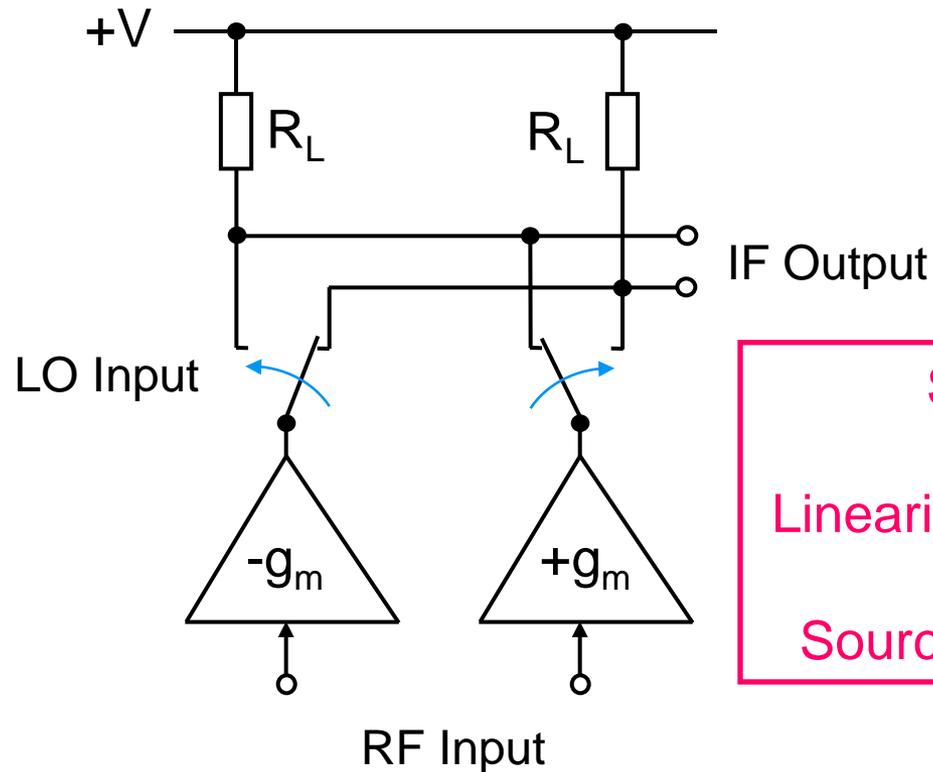
- ◆ eine Isolation zwischen Eingängen und Ausgang aufweisen

Meßgröße: Port-to-Port Isolation/Feedthrough

Multiplizierer-Mixer

Linearität des Multiplizierer-Mixer: double-balanced mixer

Widerstand
⇒ keine
Linearitäts-
probleme !!



Steilheit
⇒
Linearitätsprobleme !!
Abhilfe:
Source-Widerstand



Aufgaben und Meßgrößen eines Mixers

Ein Mixer soll

- ◆ die Differenz- und Additionsfrequenzen ohne Störfrequenzen bilden

Meßgröße: „Balancing“ von Mixern

- ◆ die Differenz- bzw. Additionsfrequenzen verstärken

Meßgröße: aktiver/passiver Mixer, conversation gain/loss

- ◆ selbst minimal rauschen

Meßgröße: Single/Double-Sideband Noise figure

- ◆ geringe Leistungsaufnahme aufweisen (insbesondere bei batteriebetriebenen Geräten wie Handys)

- ◆ eine weiten “input dynamic range“ aufweisen, d.h. gute Linearität und „Trennschärfe“ besitzen

Meßgröße: 1dB-compression point, second/third-order intercept point

- ◆ eine Isolation zwischen Eingängen und Ausgang aufweisen

Meßgröße: Port-to-Port Isolation/Feedthrough

Multiplizierer-Mixer

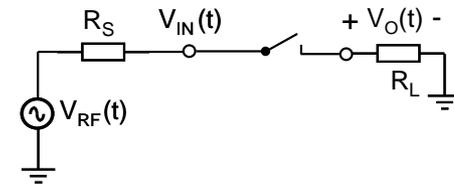
Beurteilung des Multiplizierer-Mixers:

Vorteil:

- aktive Mixer \Rightarrow conversion gain

Nachteil:

- Kenngrößen abhängig einstellbar (Bsp. conversion gain vs. Linearität)
- hoher Leistungsbedarf für LO-Signal
- „starkes“ Rechteckssignal \Rightarrow LO-feedthrough
- Rechteckssignal: 3. Harmonische -10dB, 5. Harmonische -14dB,
 \Rightarrow Filter nötig



Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ↳ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ↳ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 -  Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ↳ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ↳ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ↳ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

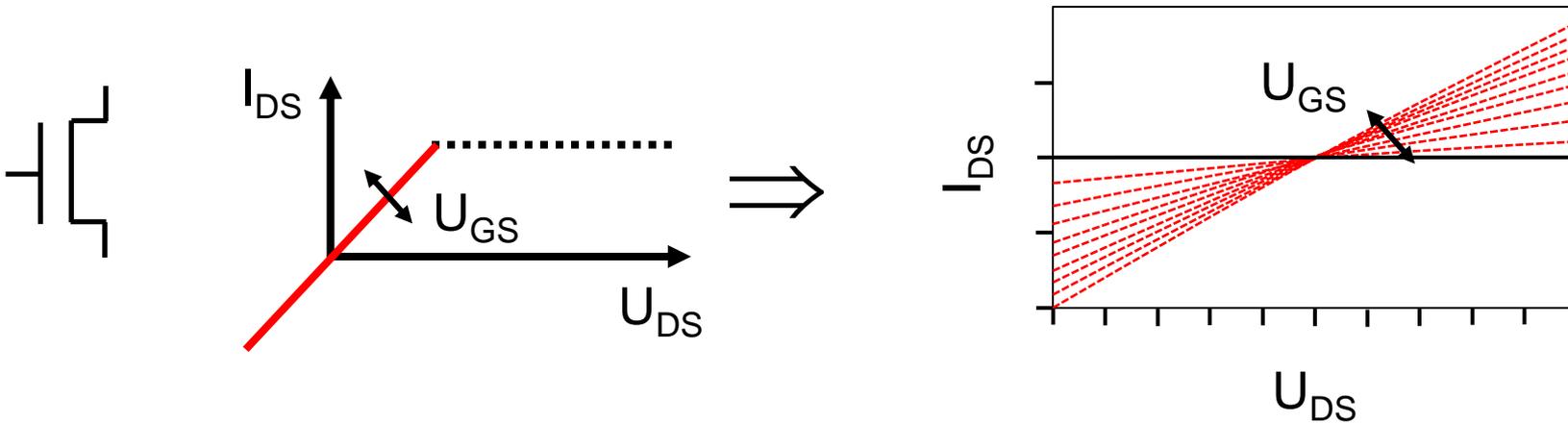
Linearer Mixer

NMOS im linearem Bereich (Widerstandsbereich)

I-V-Zusammenhang:

$$I_{DS} = k_N \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(U_{GS} - U_{TN}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{für kleine } U_{DS}!!$$

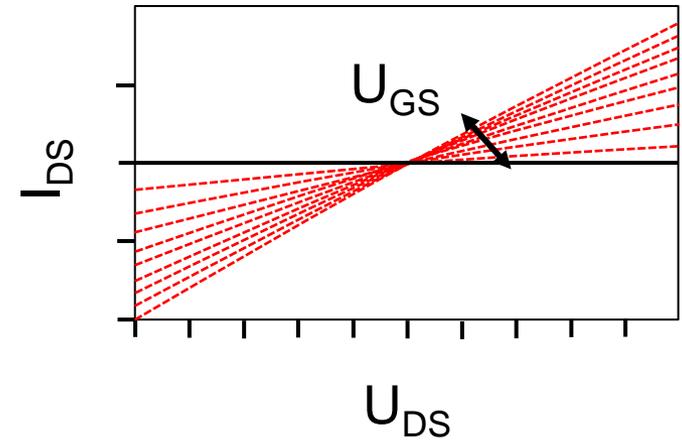
„Channel resistance“ gesteuert von U_{GS} :



Linearer Mixer

I-V-Zusammenhang:

$$I_{DS} = k_N \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(U_{GS} - U_{TN}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$



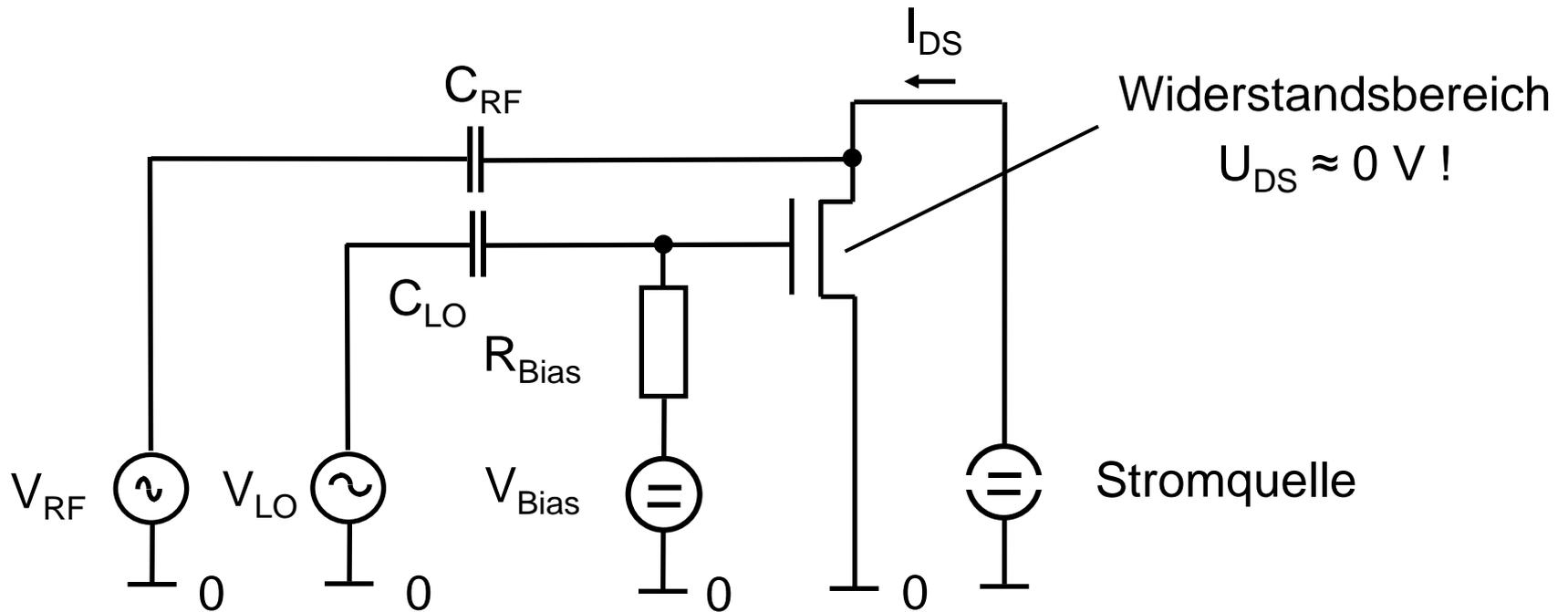
Idee:

- | | |
|-------------------------|------------------------------------|
| -Gate-Source-Spannung: | eine zu mischende Frequenz |
| -Drain-Source Spannung: | die andere zu mischende Frequenz ! |



Linearer Mixer

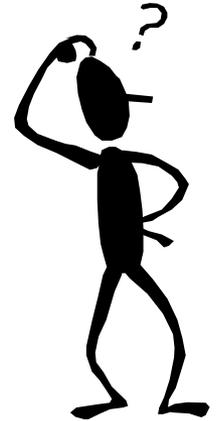
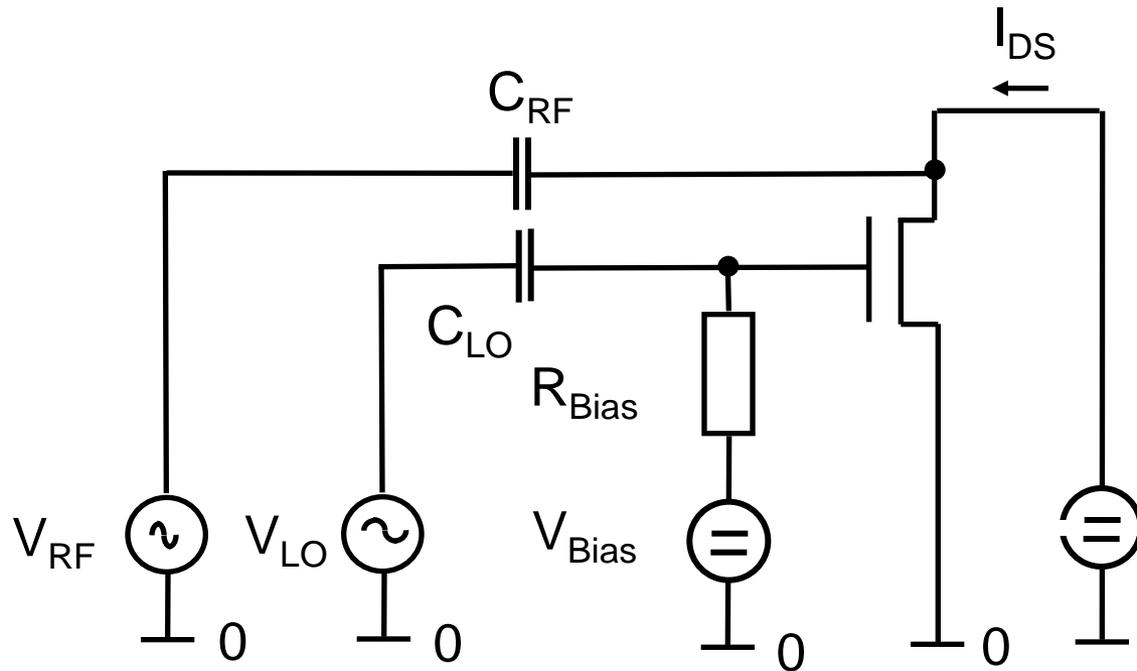
NMOS im linearem Bereich als down-conversion Mixer (infradyne):



Linearer Mixer

Frage: Ist der lineare Mixer ein aktiver oder passiver Mixer ?

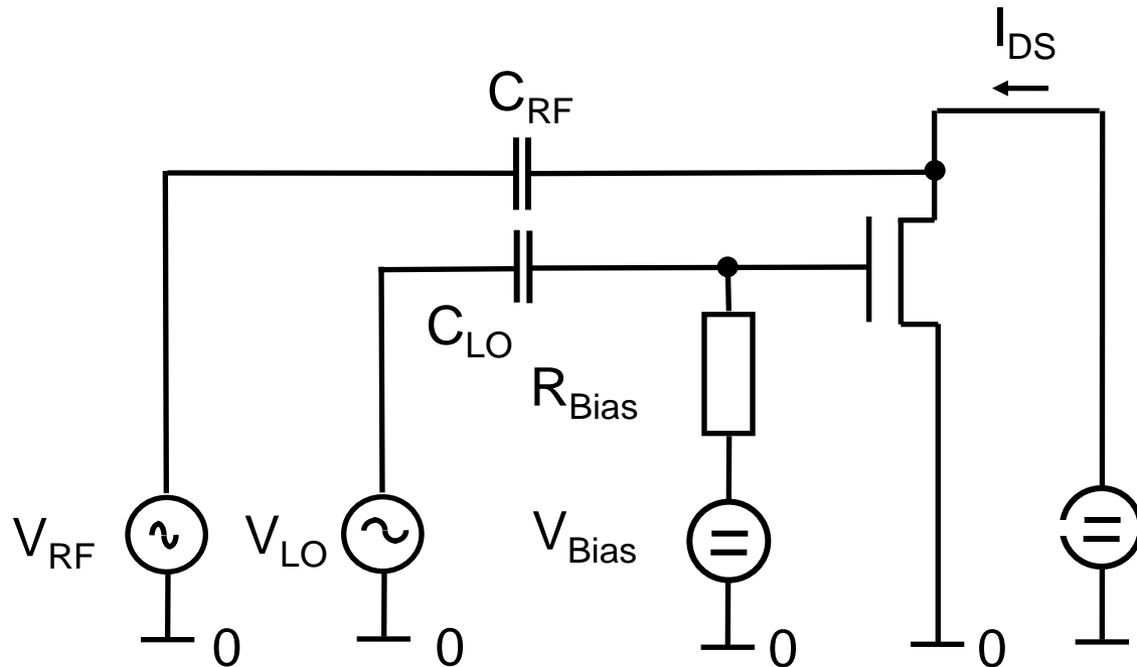
Antwort: ??



Linearer Mixer

Frage: Ist der lineare Mixer ein aktiver oder passiver Mixer ?

Antwort: passiver Mixer, da $U_{DS} \approx 0$ Volt

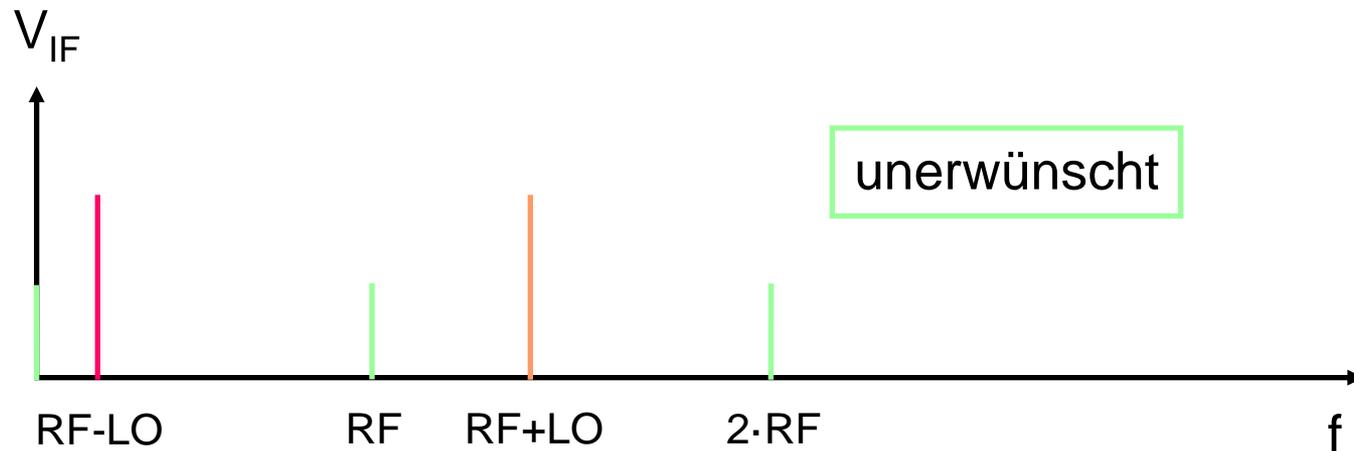


Linearer Mixer

Prinzip des linearen Mixer mit MOS-Transistor

Simulationsergebnis am Ausgang $RF=U_{DS}$, $LO=U_{GS}$, infradyne

$$I_{DS} = k_N \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(U_{GS} - U_{TN}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{für kleine } U_{DS}!!$$



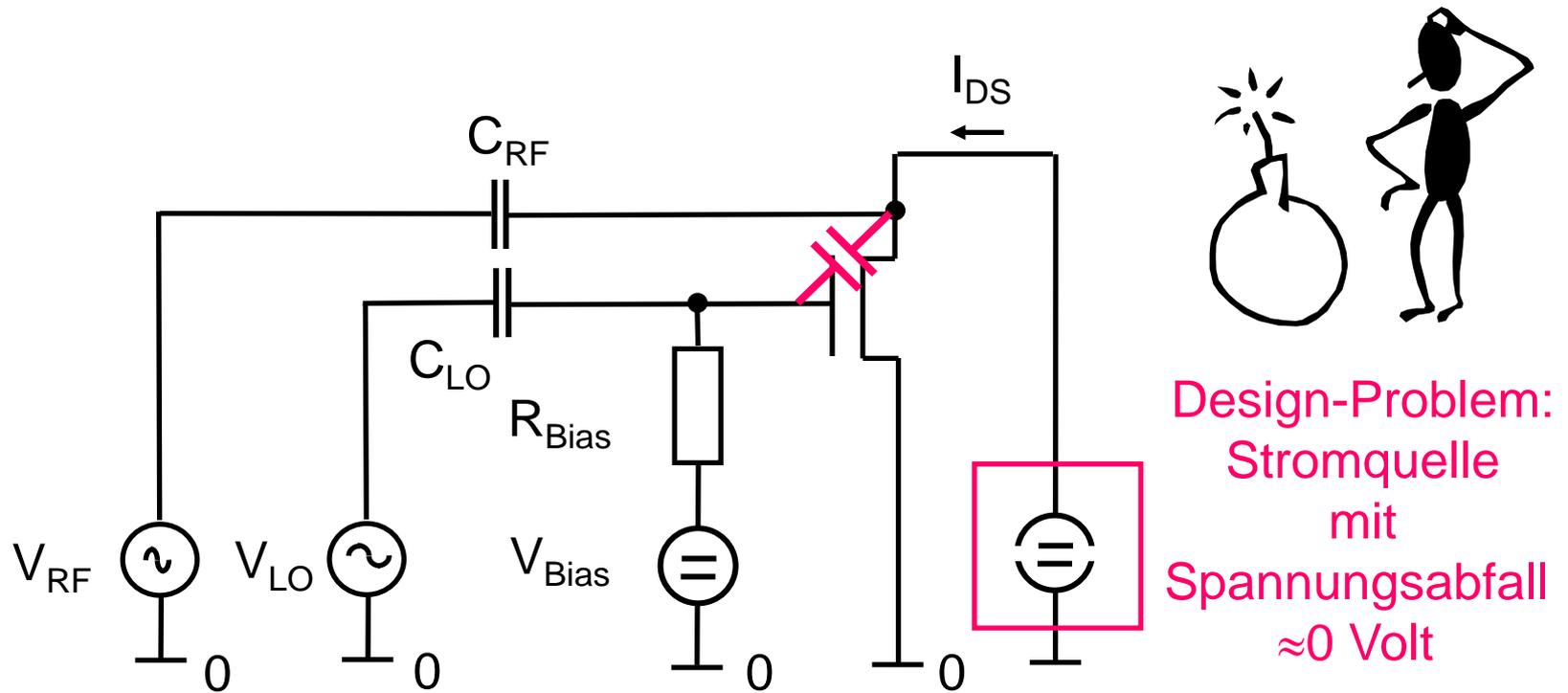
Vorteil: -wenig „Störendes“

Nachteil: -störender Term: Drain-Source-Spannung im Quadrat, RF



Linearer Mixer

NMOS im linearem Bereich als down-conversion Mixer:



$C_{GD} \Rightarrow$ Port-to-Port Feedthrough
3 Anschlüsse \Leftrightarrow single MOS: 2 Möglichkeiten
Alternativen ??



Linearer Mixer

Alternative:

-double-balanced Anordnung !!



Ring-Mixer



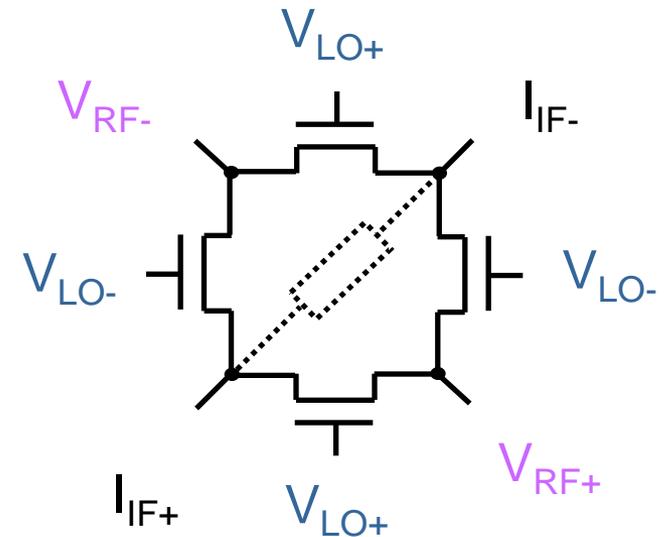
Idee "Ring-Mixer":

Beispiel:
Down-Conversion Mixer (infradyne)

Gate-Source-Spannung (viermal): LO+/-

Drain-Source-Spannung (zweimal): RF+/-
keine Drain-Source-DC-Spannung !!

Drain-Source-Spannung (zweimal): IF/BB+/-



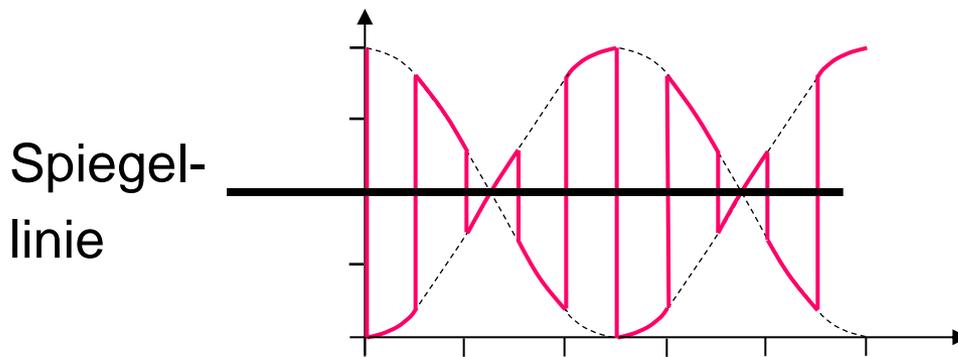
nach Addition der Ströme: I_{IF} proportional $V_{RF} \cdot V_{LO}$, Widerstand $\Rightarrow V_{IF}$
Auslöschung der „störenden“ Quadrate und Spannung durch Überlapp-Cs!!

Ring-Mixer

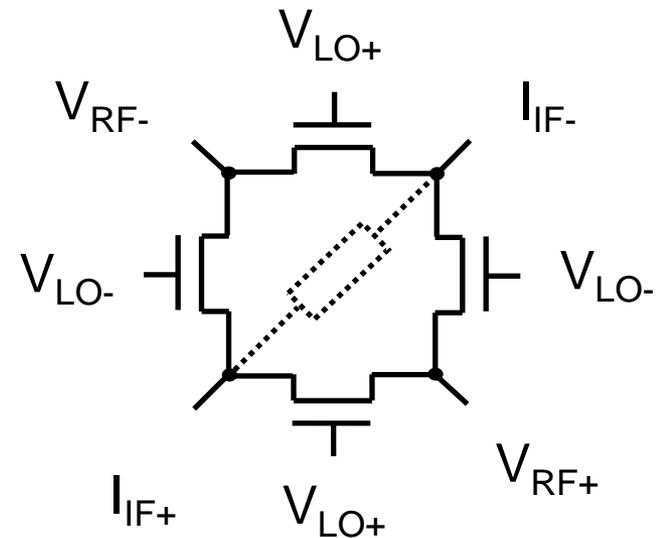
Funktionsweise des Ring-Mixers:

durch Schalter LO+/- wird das RF+/- abwechselnd an die IF+/- -Ausgänge gelegt

Differentielle Ausgangsspannung



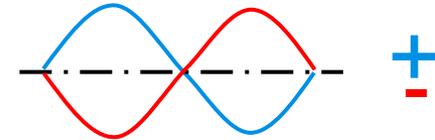
LO-Polaritätswechsel
leicht erkennbar



Auslöschung der „störenden“ Quadrate und Spannung durch Überlapp-Cs!!

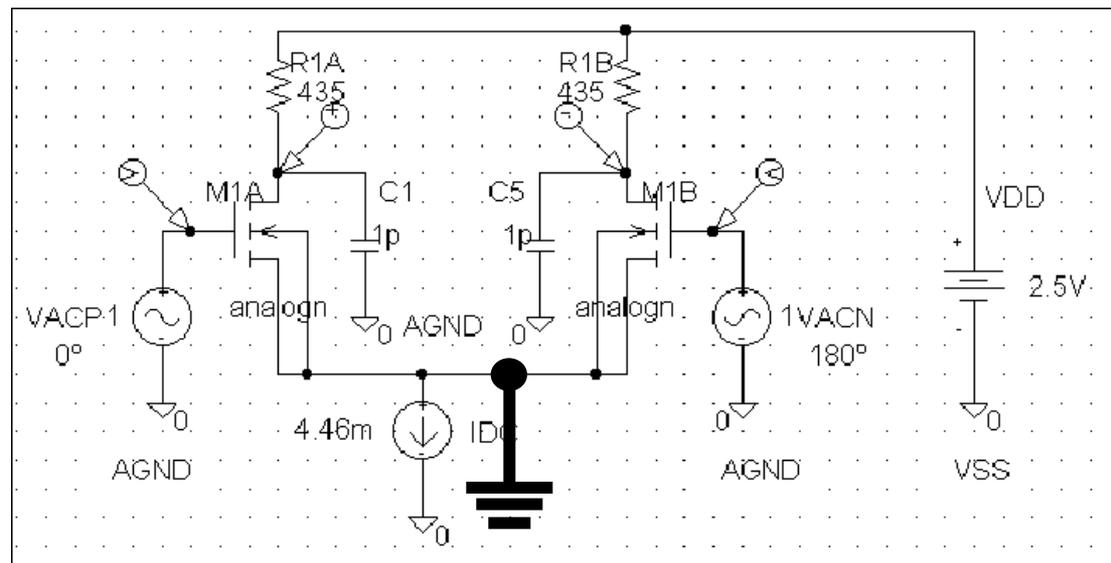
Ring-Mixer

Virtuelle Masse (=Analog Ground) - differentielles Signal (ein Eingang)
differentielles Signal \Rightarrow gleiche Amplitude, Phasenverschiebung 180°
 \Rightarrow bei Addition destruktiv \Rightarrow virtuelle Masse !!



Möglichkeit zum Auffinden der virtuelle Massepunkte dieses Effektes bei differentieller Signalen: alle Schaltungspunkte, die über gleiche Impedanzen mit den differentiellen Punkten verbunden ist

Beispiel:



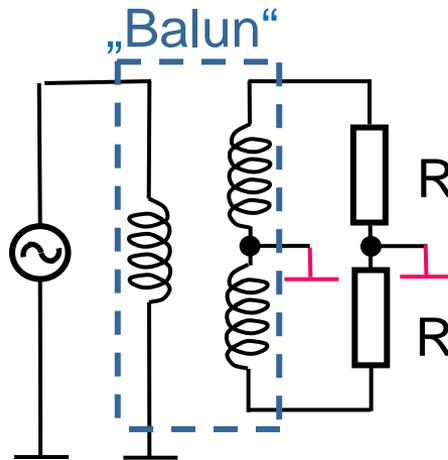
Analog Ground

Ring-Mixer

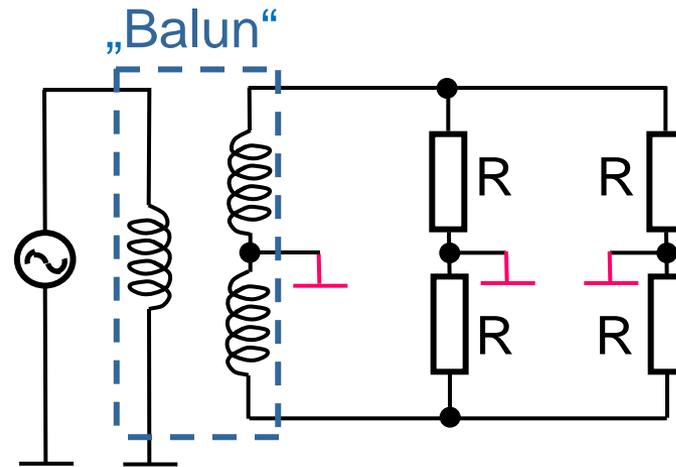
Virtuelle Masse bei Mixern - differentielles Signal (mehrere Eingänge, **zeitvariant**)

Auffinden der virtuelle Masse bei differentieller Signalen eines bestimmten Eingangs: alle Schaltungspunkte, die über gleiche Impedanzen mit den differentiellen Punkten verbunden sind **zu allen Zeiten**

Beispiel:

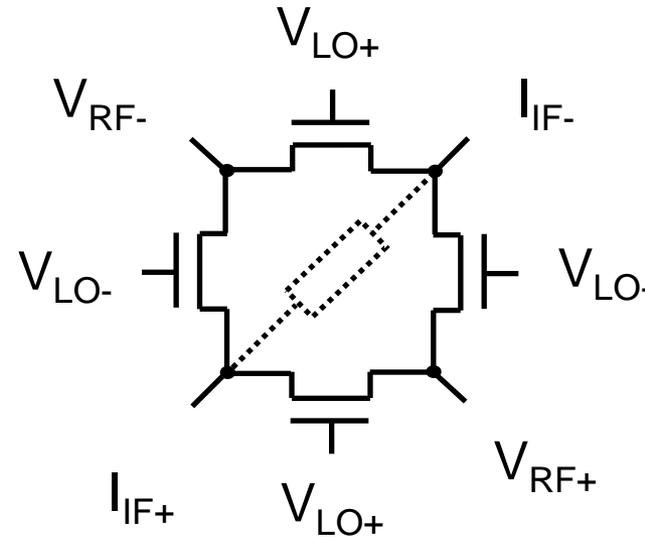


Ring-Mixer



Beispiel: Ring-Mixer

unbeteiligte Spannungsquellen: feste Spannung
 z.Bsp. $V_{RF+/-}$ virtuelle Masse ?
 $\Rightarrow V_{LO+/-}$ feste Spannung



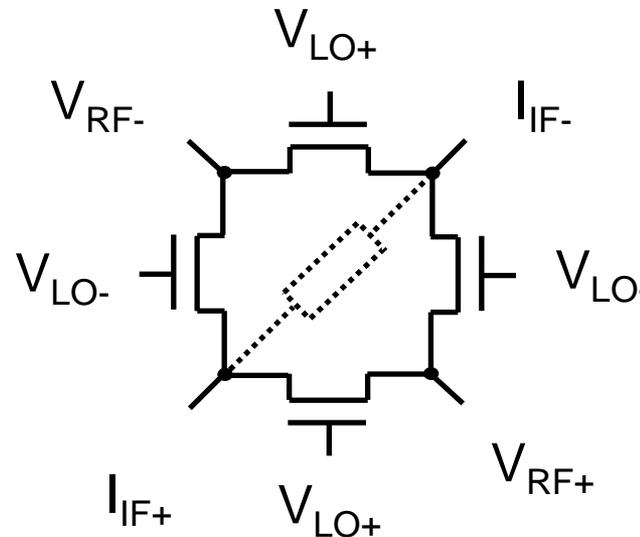
Ring-Mixer



Isolation des Ring-Mixers:

RF+/-	virtuelle Masse: IF+/-
IF+/-	virtuelle Masse: RF+/-
LO+/-	virtuelle Masse: Source/Drain

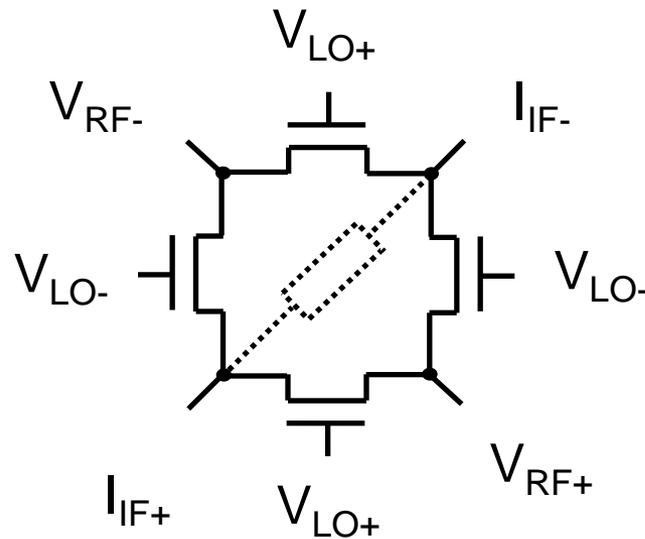
⇒ theoretisch perfekte Isolation der Ports wegen Vertauschung der jeweiligen Massepunkte !!



Ring-Mixer

Frage: Ist der Ring-Mixer ein aktiver oder passiver Mixer ?

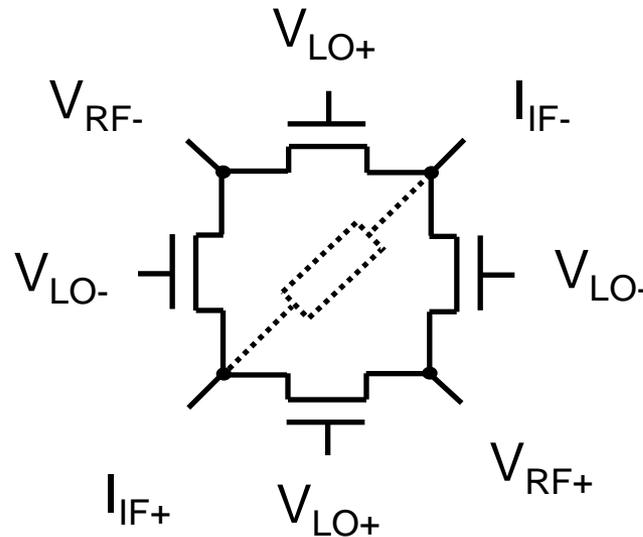
Antwort: ??



Ring-Mixer

Frage: Ist der Ring-Mixer ein aktiver oder passiver Mixer ?

Antwort: passiver Mixer, da $U_{DS} \approx 0$ Volt bei allen Transistoren !!



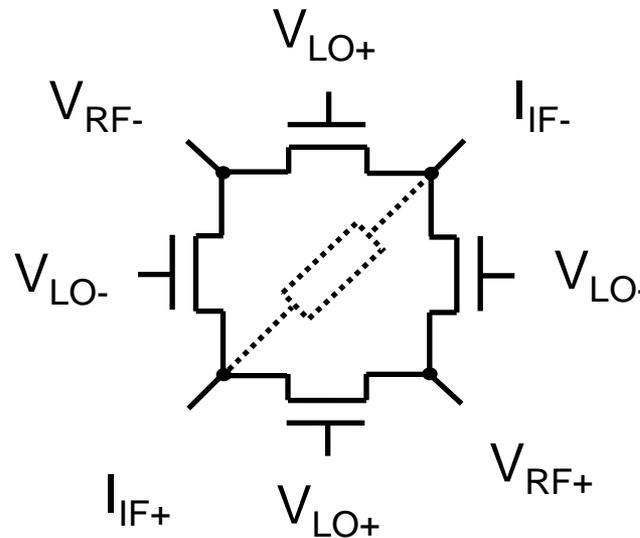
Ring-Mixer

Vorteil:

-theoretisch perfekte Isolation der Ports wegen Vertauschung der jeweiligen Massepunkte

Nachteil:

- „schwache“ Signale \Rightarrow sehr viel „conversion loss“
- Widerstand \Rightarrow Rauschen



Linearer Mixer, Ring-Mixer

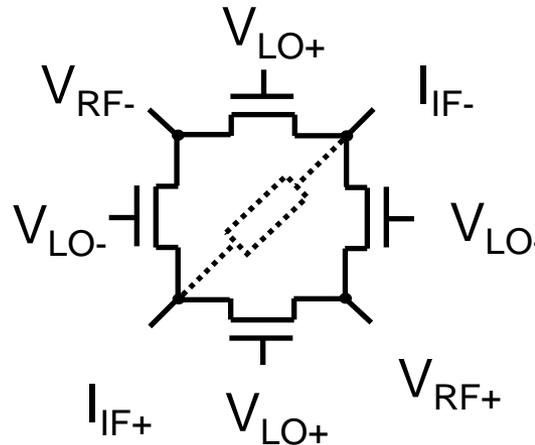
Beurteilung des linearen Mixers und des Ring-Mixers:

Vorteil:

- Betrieb mit niedriger Versorgungsspannung
- Kenngrößen unabhängig einstellbar bei Verstärkerbetrieb

Nachteil:

- passiver Mixer \Rightarrow conversion loss ohne Verstärkerbetrieb
- starkes LO-Signal

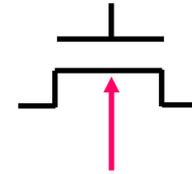


Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ☞ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ☞ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 -  auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ☞ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Substrateffekt-Mixer

Idee: MOS eigentlich 4 Anschlüsse: +Bulk



Substratsteuereffekt wirkt auf Einsatzspannung:

$$U_{TN} = U_{FB} + 2 \cdot \Phi_F + \gamma \cdot \sqrt{2 \cdot \Phi_F + U_{SB}}$$

Potenz-Reihe vom Wurzelausdruck

$$= U_{FB} + 2 \cdot \Phi_F + \gamma \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \Phi_F} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{SB}}{\sqrt{2 \cdot \Phi_F}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{SB}^2}{(2 \cdot \Phi_F)^{3/2}} + \dots \right)$$

I-V-Zusammenhang in Sättigung:

$$I_{DS} = \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - U_{TN}(U_{SB}))^2$$

für Mixerfunktion verantwortlich

Mixer-Funktion:

$$I_{DS} = \frac{k_N}{2} \cdot \frac{W}{L} \cdot [\dots + k \cdot U_{GS} \cdot U_{SB} + \dots]$$

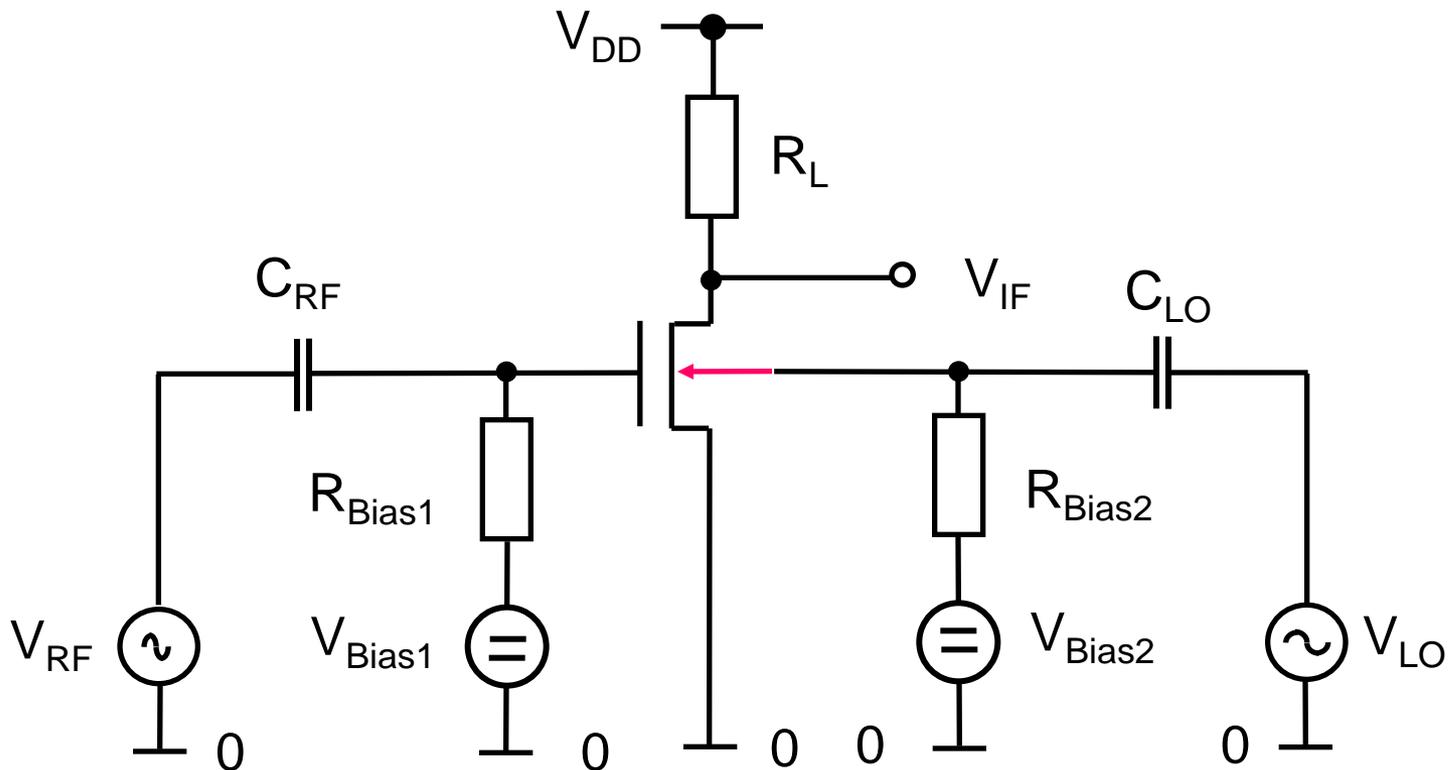
für die Multiplikation verantwortlich

Substrateeffekt-Mixer

Beispiel: Down-Conversion-Mixer (infradyne)

Gate-Source-Spannung: RF

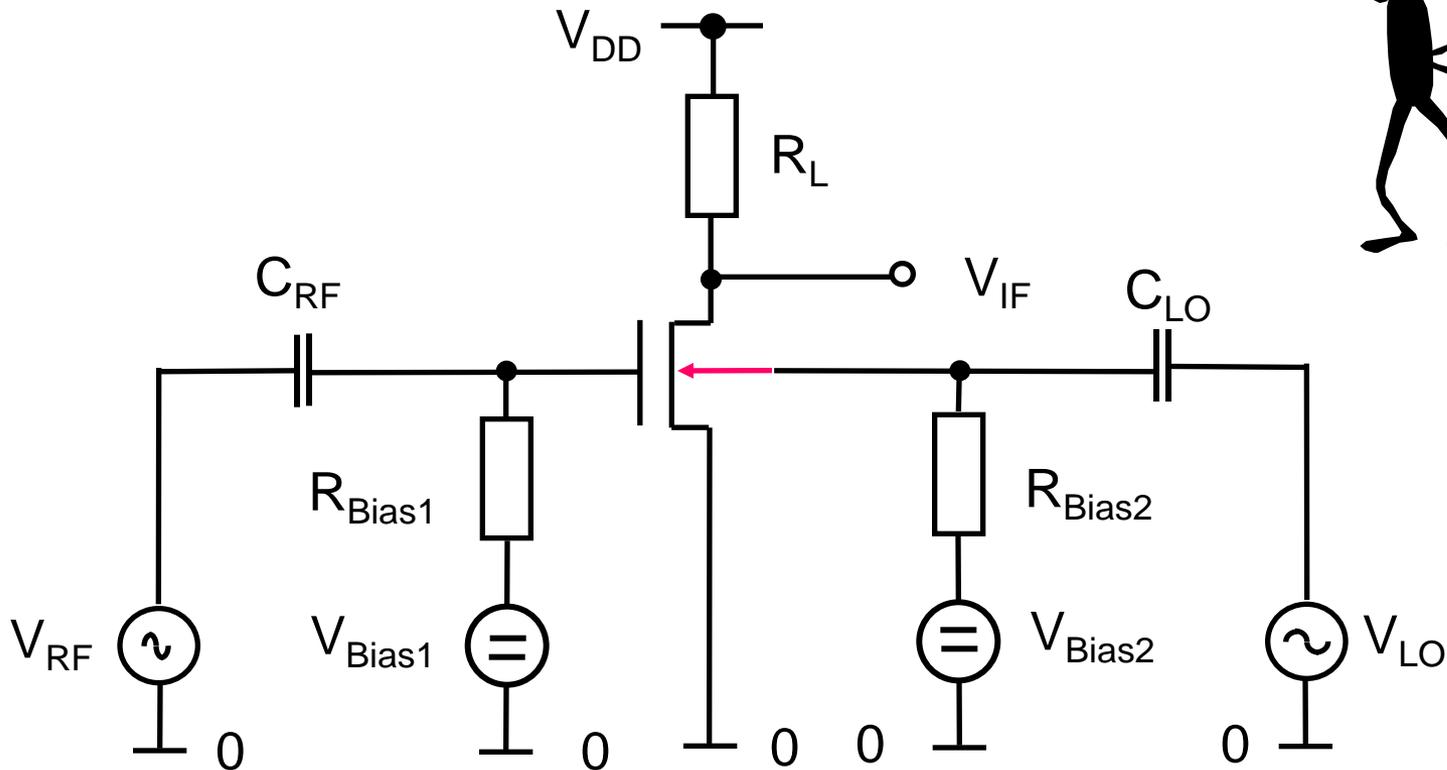
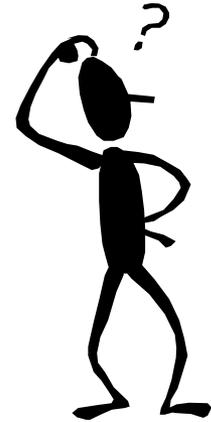
Bulk-Source Spannung: LO



Substrateffekt-Mixer

Frage: Könnte die RF- und LO-Anschlüsse ausgetauscht werden?

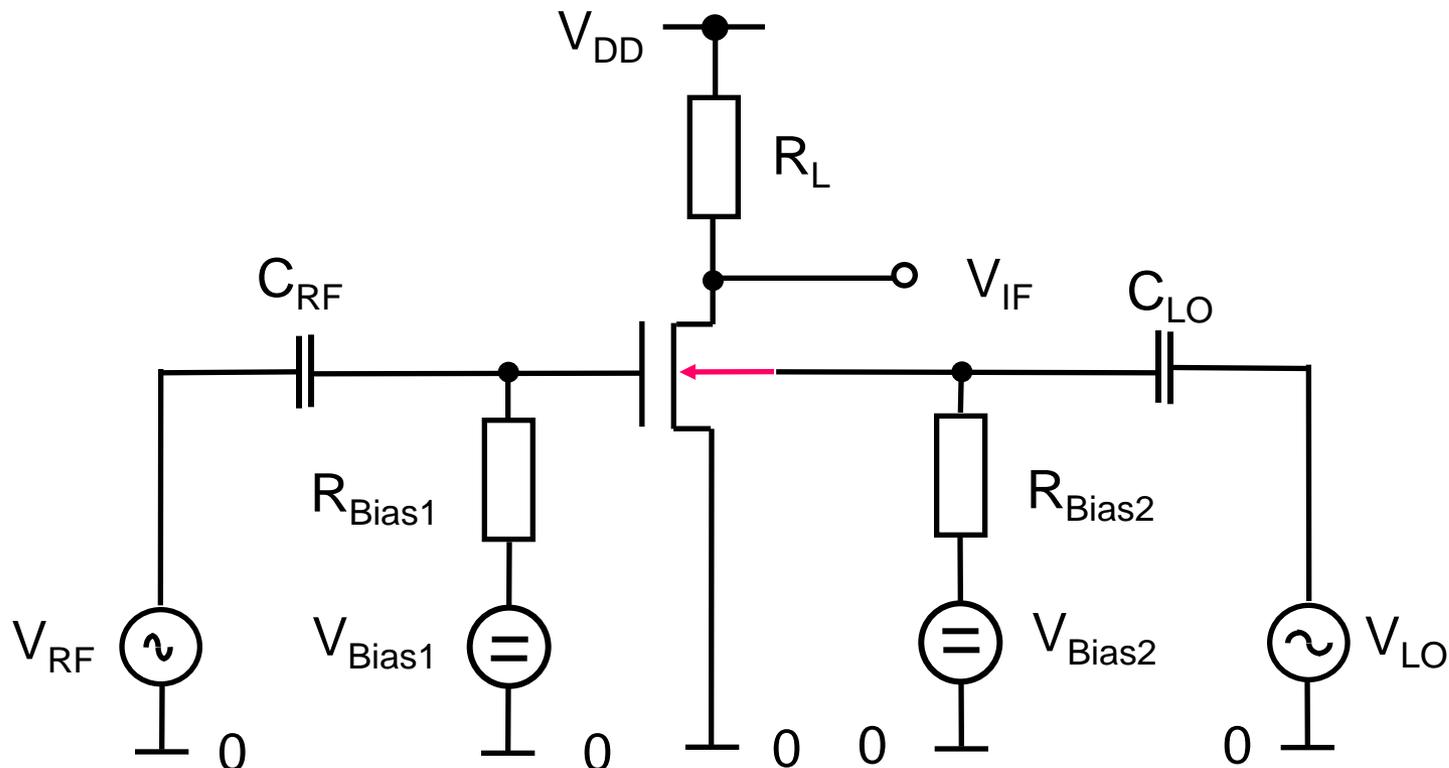
Antwort: ??



Substrateeffekt-Mixer

Frage: Könnte die RF- und LO-Anschlüsse ausgetauscht werden?

Antwort: nicht vertauschbar, da $g_{M, Gate} \gg g_{M, Bulk} \Rightarrow$ frei bestimmbare Amplitude von LO an Bulk, nicht frei bestimmbare Amplitude von RF am Gate !!



Substrateffekt-Mixer

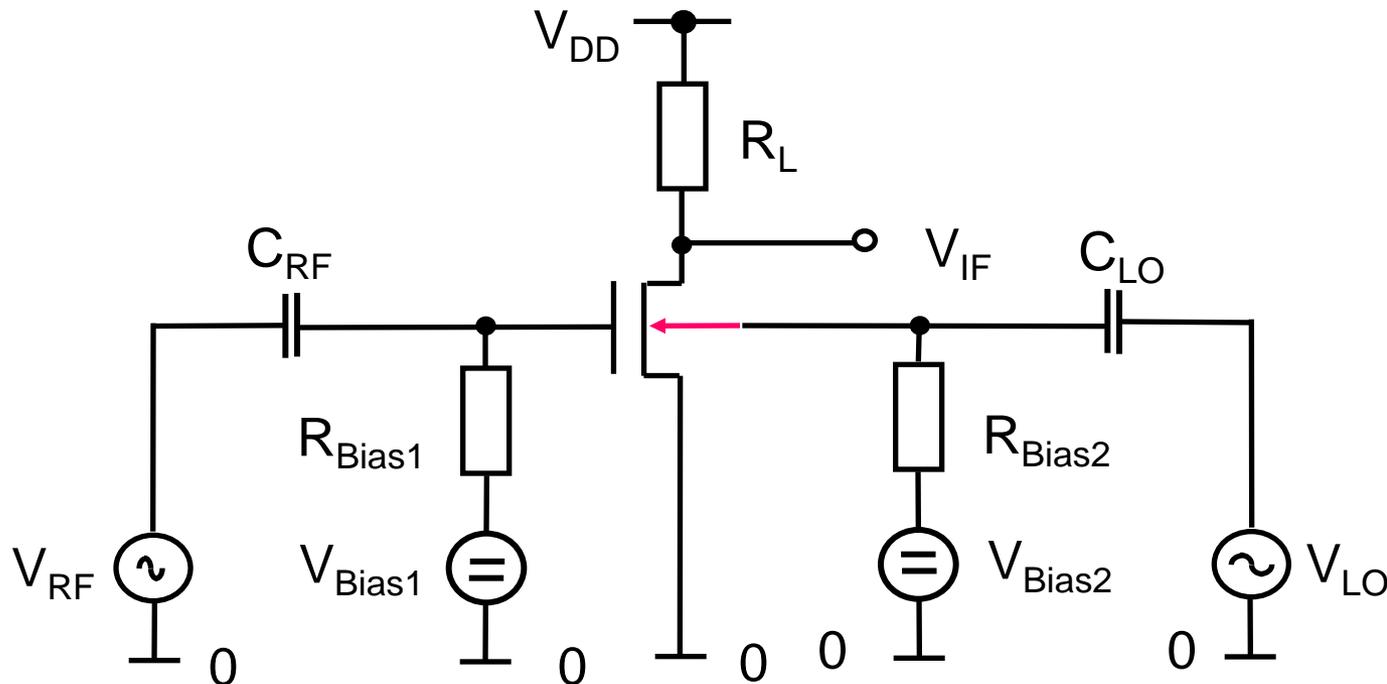
Beurteilung des Substrateffekt-Mischers:

Vorteil:

- wenig „Parasitäres“
- Betrieb mit niedriger Versorgungsspannung

Nachteil:

- viele unerwünschte Frequenzen am Ausgang



Gliederung

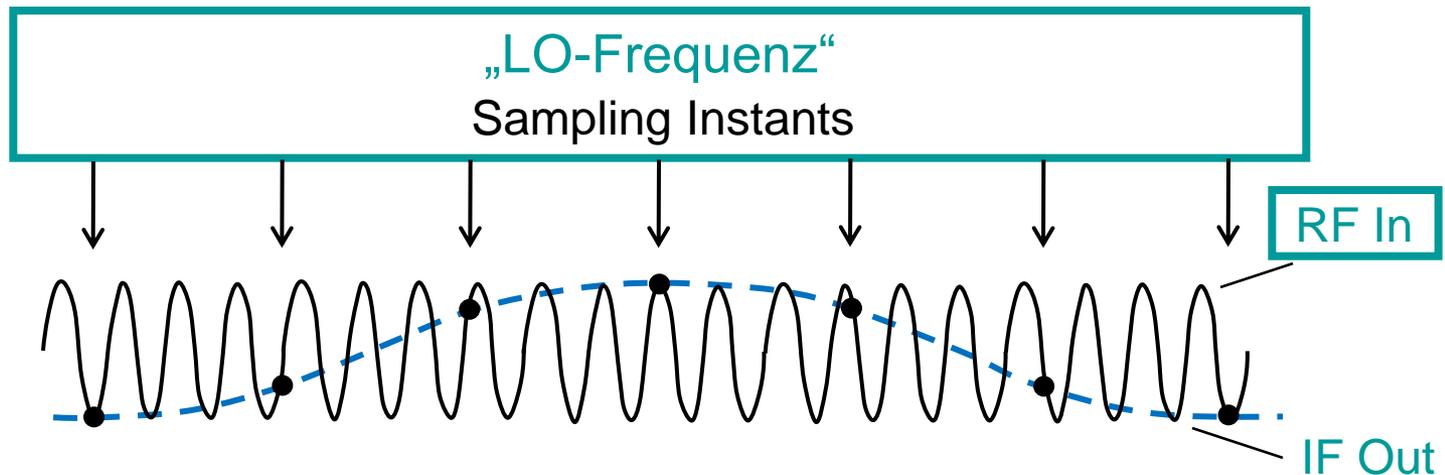
- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ☞ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ☞ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 -  auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ☞ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Subsampling-Mixer

Prinzip des Subsampling-Mixer:

Track-and-Hold (T/H)-Schaltung als Down Conversion-Mixer

Eingangsfrequenz (RF) • T/H-Sampling-Frequenz („LO-Frequenz“)



Vorteil: „LO-Frequenz“ niederfrequent !!

Nachteil: „Reaktionszeit“ der T/H-Schaltung

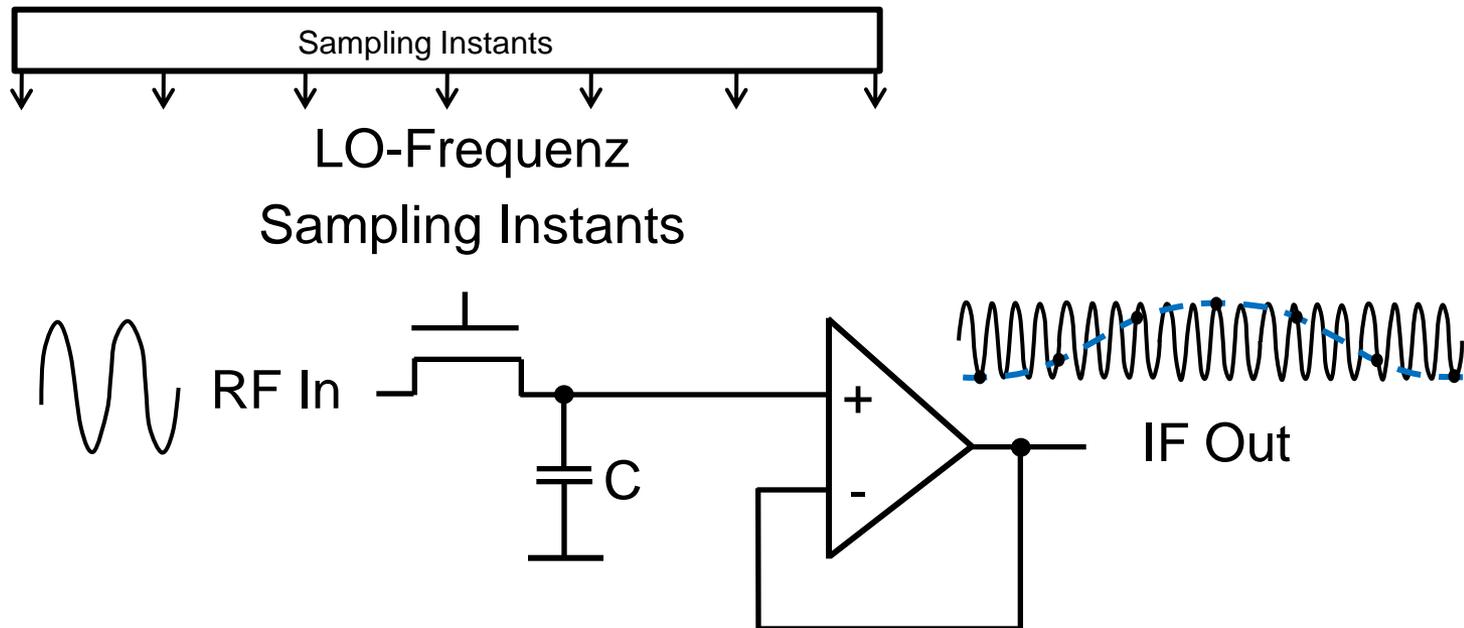
(Umschalten auf Hold-Modus muß sehr schnell geschehen)

Subsampling-Mixer

Einfache Track-and-Hold (T/H)-Schaltung in MOS-Technologie:

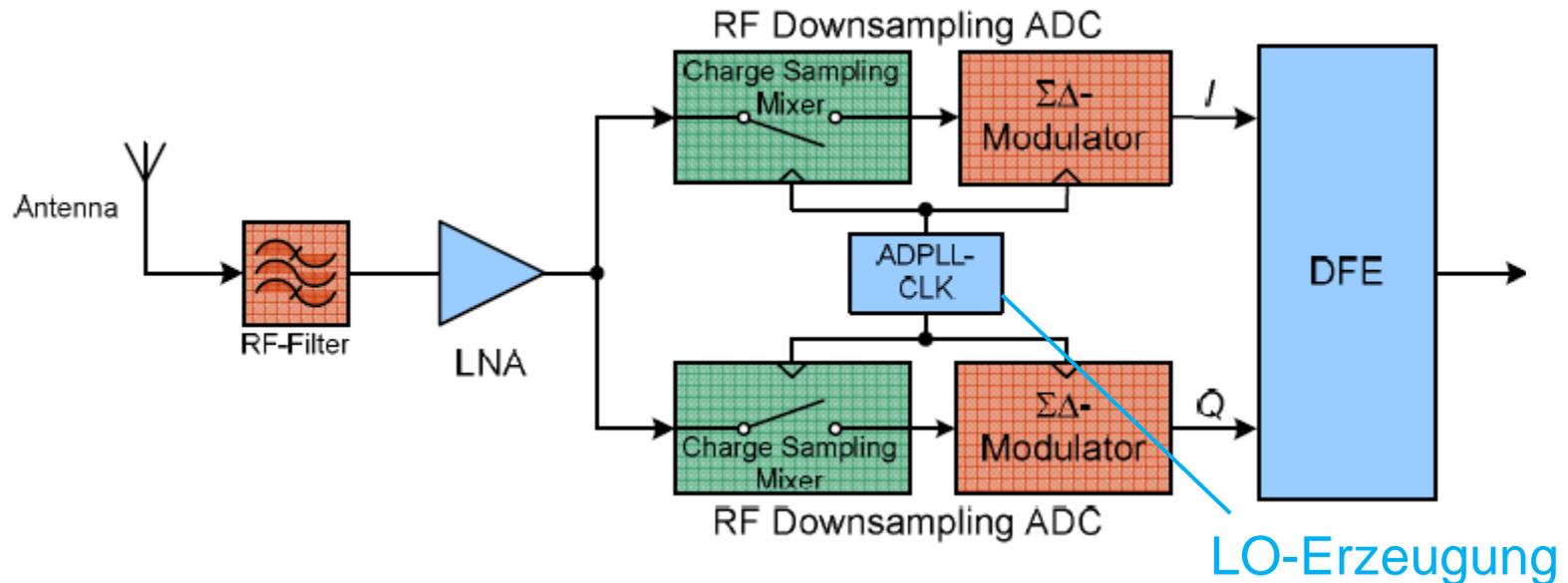
Track: NMOS $\Rightarrow 0 \Omega$

Hold: NMOS $\Rightarrow \infty \Omega$



Subsampling-Mixer

Einfache Track-and-Hold (T/H)-Schaltung in MOS-Technologie:



L. Maurer, "Adaptive Digital Front-End enhanced CMOS-based RF transceivers: A brief overview", Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits, 2008

Weitere Mixer

Weitere Mixer:

- (Sub-)Harmonic-Mixer
 - Star-Mixer
 - Distributed Mixer
 - Vier-Quadranten-Mixer
- usw.



aber in MOS-Technologie die gebräuchlichsten aufgeführt !!

Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ☞ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ☞ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ☞ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

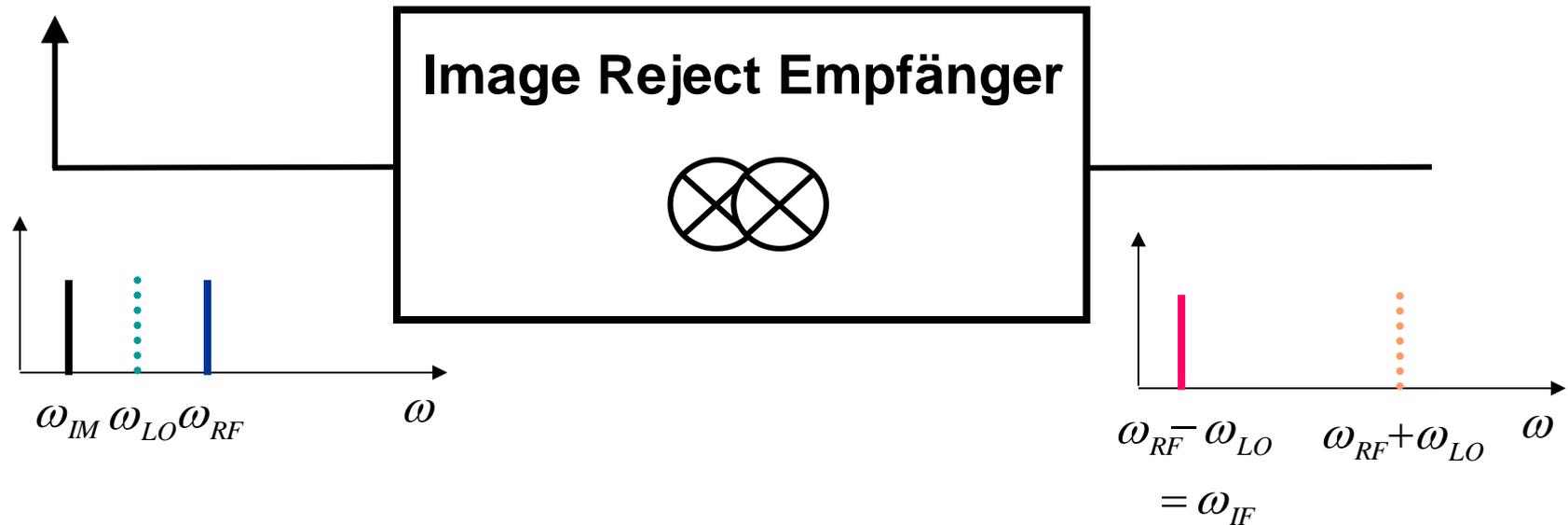
(Super-)Heterodyne-Empfänger

optimale Empfängerschaltung für ein „Single-Chip-Handy“ ??

andere Lösungen: „Image Reject Empfänger“

(„Image Reject Mixer“)

Antenne



„Image Reject Empfänger“ Näheres in Mixer-Vorlesung !!

Image-Reject-Mixer

Untersuchung der 90°-Grad-Drehung:

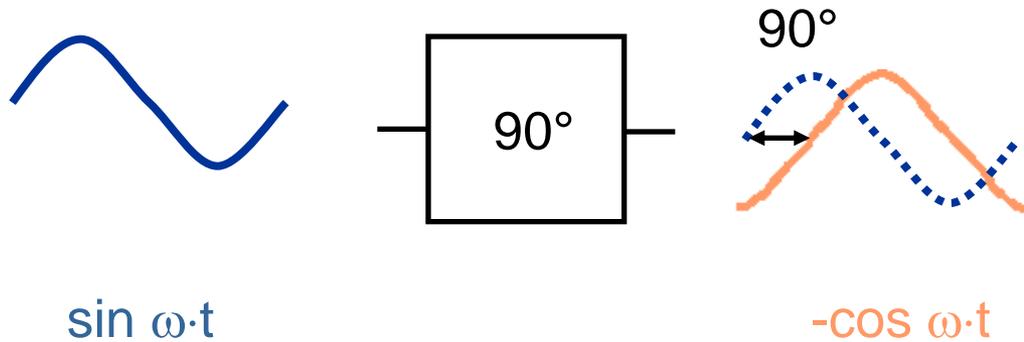


Image-Reject-Mixer

Image Reject Empfänger nach Hartley:
(ohne Amplitudenbetrachtung)

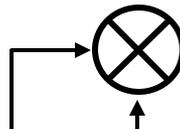
$$\begin{aligned} & \sin(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t + \sin(\omega_{LO} - \omega_{IM}) \cdot t \\ &= -\sin(\omega_{RF} - \omega_{LO}) \cdot t + \sin(\omega_{LO} - \omega_{IM}) \cdot t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos(\omega_{RF} - \omega_{LO}) \cdot t \\ & - \cos(\omega_{LO} - \omega_{IM}) \cdot t \\ &= \cos(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t \\ & - \cos(\omega_{LO} - \omega_{IM}) \cdot t \end{aligned}$$

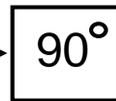
$$\begin{aligned} & \cos \omega_{RF} \cdot t \\ & + \cos \omega_{IM} \cdot t \end{aligned}$$

RF Input

$\sin \omega_{LO} t$
 $\cos \omega_{LO} t$



A



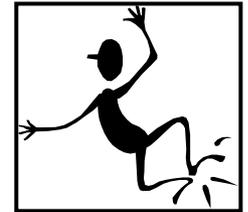
C



B



IF Output



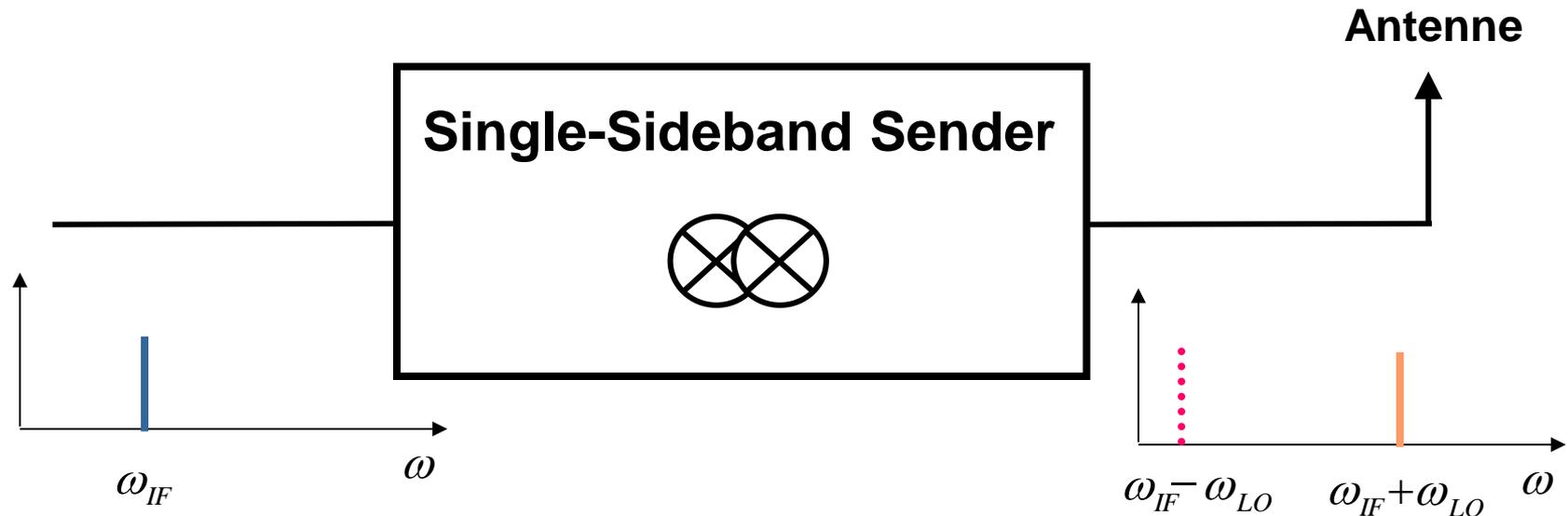
$$\cos(\omega_{RF} - \omega_{LO}) \cdot t$$

$$\cos(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t + \cos(\omega_{LO} - \omega_{IM}) \cdot t$$

Heterodyne-Sender

optimale Senderschaltung für ein „Single-Chip-Handy“ ??

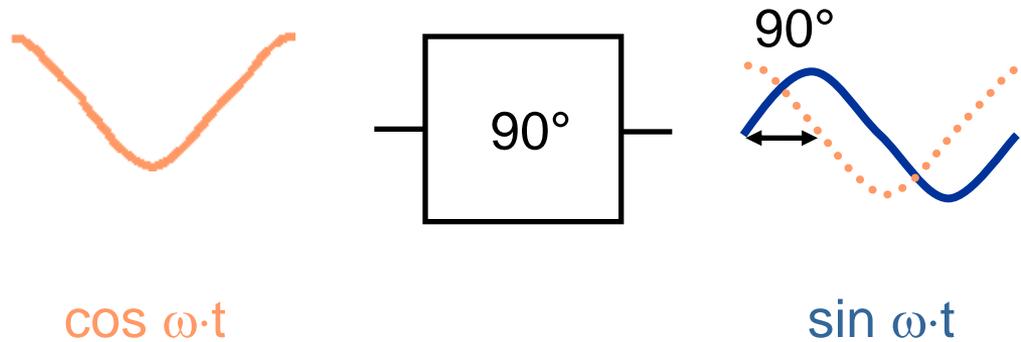
**andere Lösungen: „Single-Sideband-Sender“
(„Single-Sideband-Mixer“)**



„Single-Sideband-Sender“ Näheres in Mixer-Vorlesung !!

Single-Sideband-Mixer

Untersuchung der 90°-Grad-Drehung:



Single-Sideband-Mixer

Single-Sideband Mixer:

(ohne Amplitudenbetrachtung)

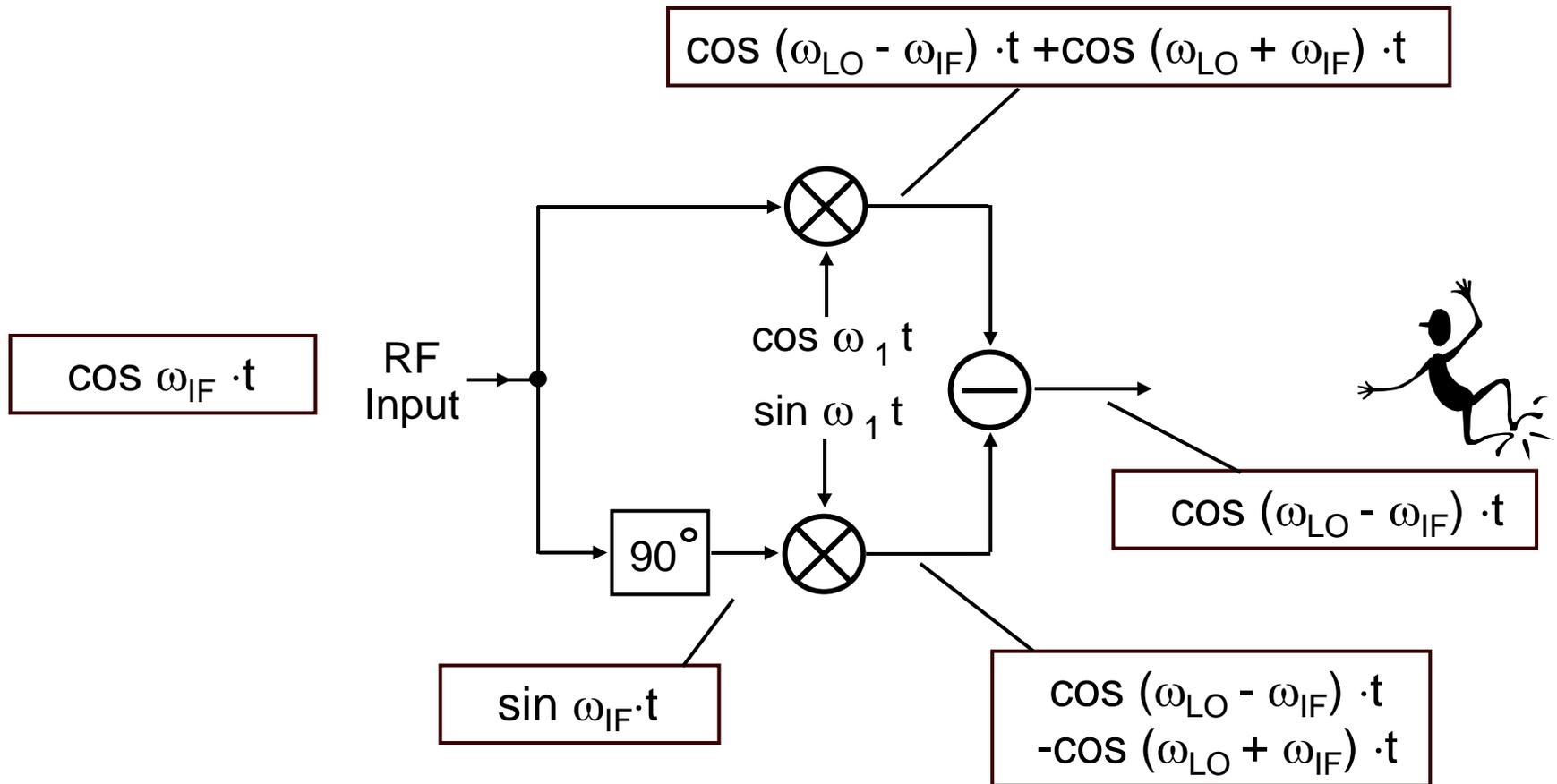
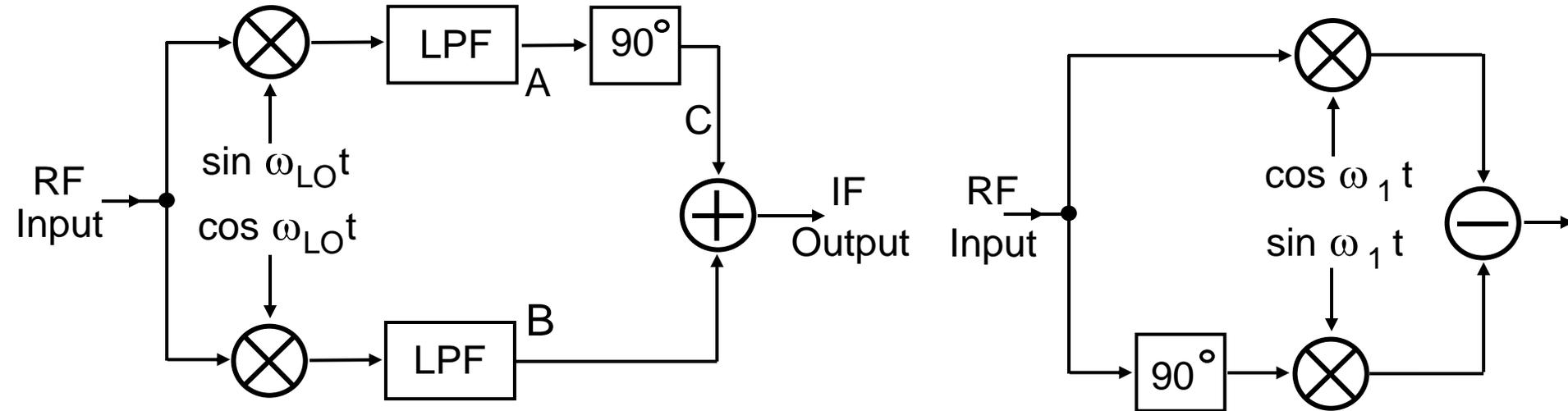


Image-Reject-Mixer, Single-Sideband Mixer

„Single-Sideband-Mixer“ und Image-Reject-Mixer“ auf demselben Prinzip:

90°-Verschiebung sowohl bei LO-Signal als auch beim Signal selbst !!



Idealfall: gleiche Verstärkung in den Armen, 90°-Phasenverschiebung

Image-Reject-Mixer, Single-Sideband Mixer

Frage: Wie macht diese 90° -Verschiebung sowohl bei LO-Signal als auch beim Signal selbst ??

Antwort: ??

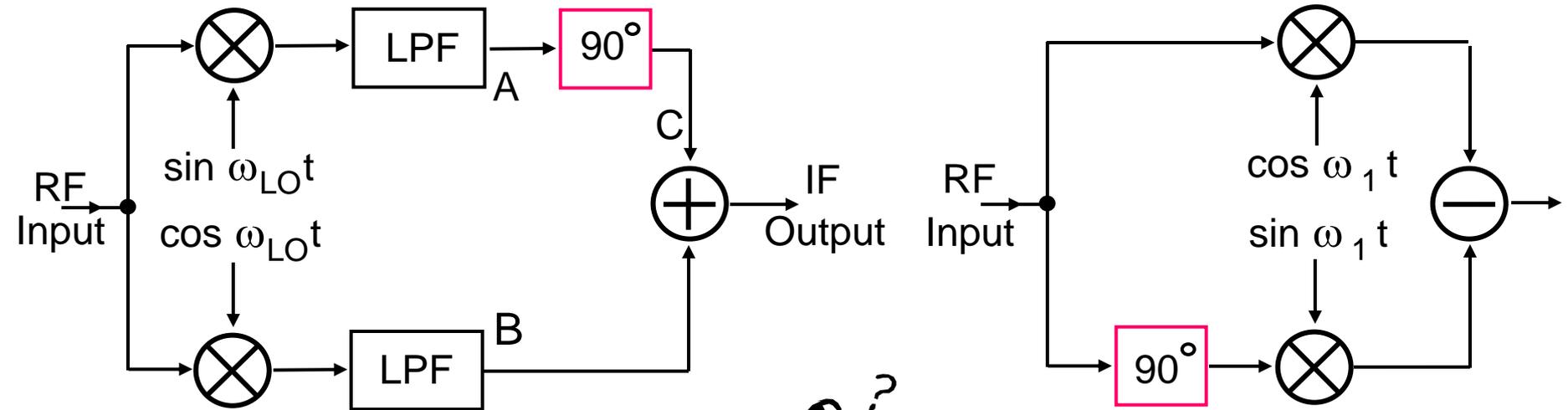
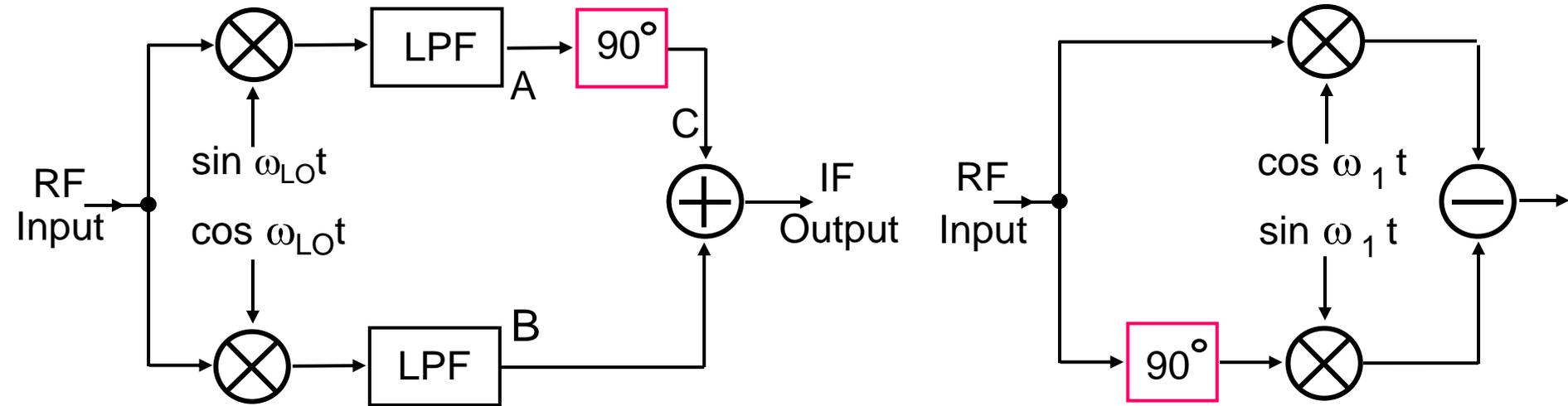


Image-Reject-Mixer, Single-Sideband Mixer

Frage: Wie macht diese 90°-Verschiebung sowohl bei LO-Signal als auch beim Signal selbst ??

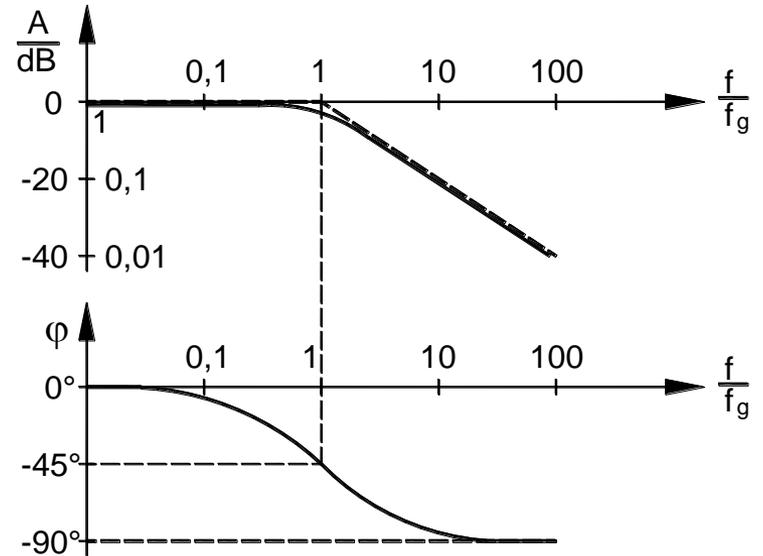
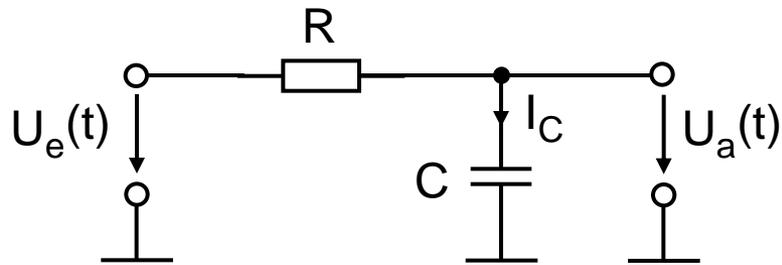
Antwort: durch Hoch- und Tiefpässe als einfachste Lösung !!



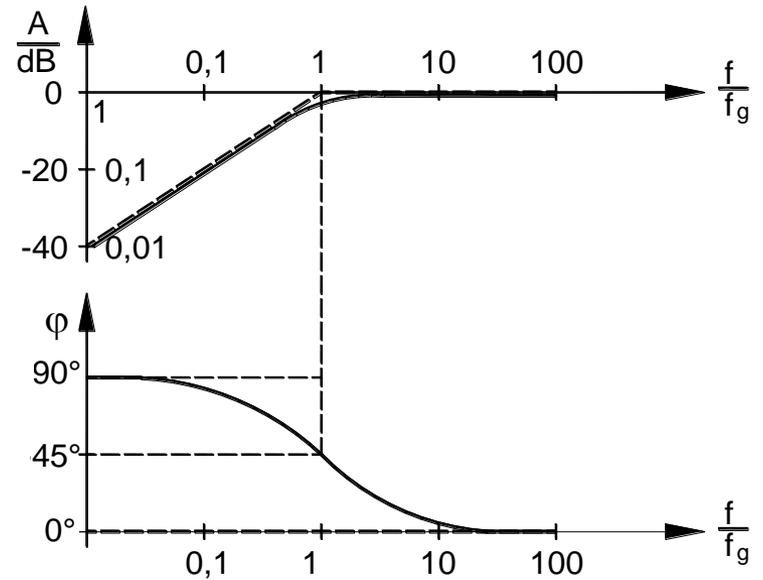
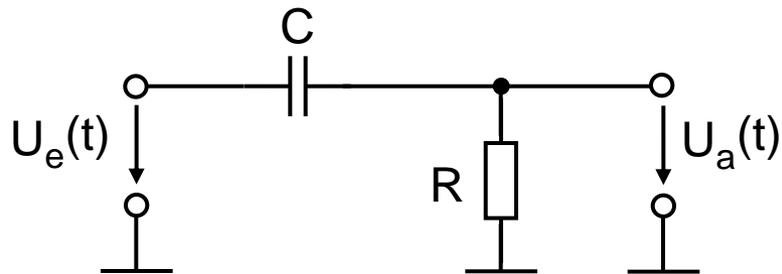
Idealfall: gleiche Verstärkung in den Armen, 90°-Phasenverschiebung

RC-CR-Schaltung

RC-Tiefpaß -45° bei Zeitkonstante τ

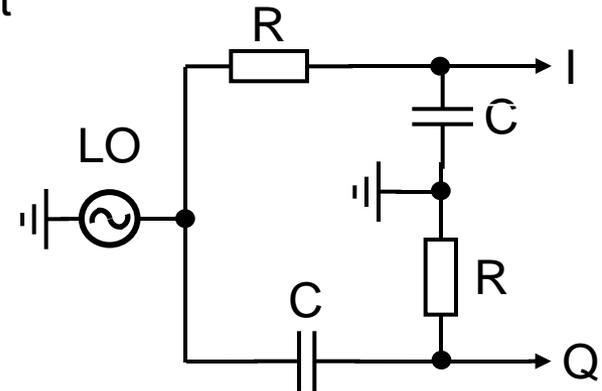
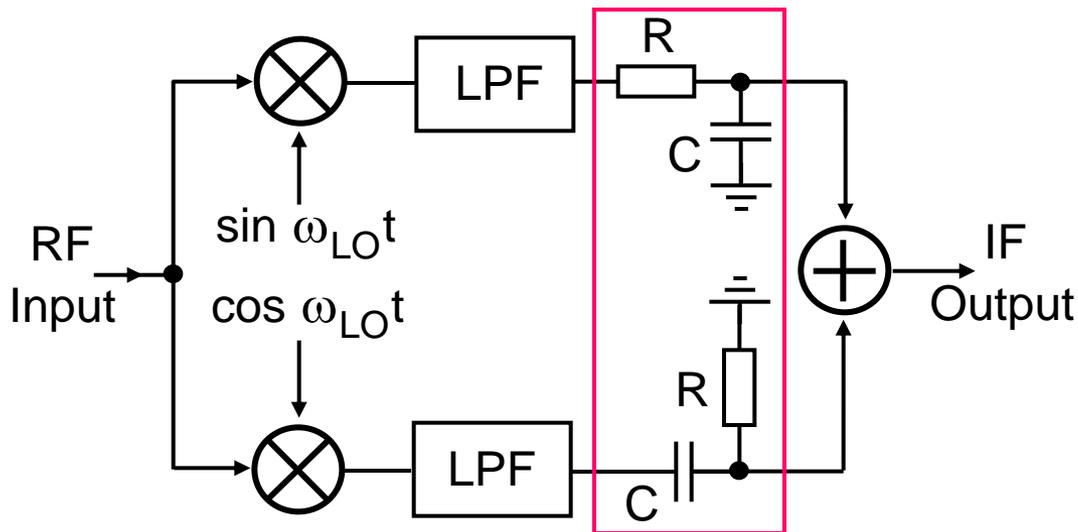
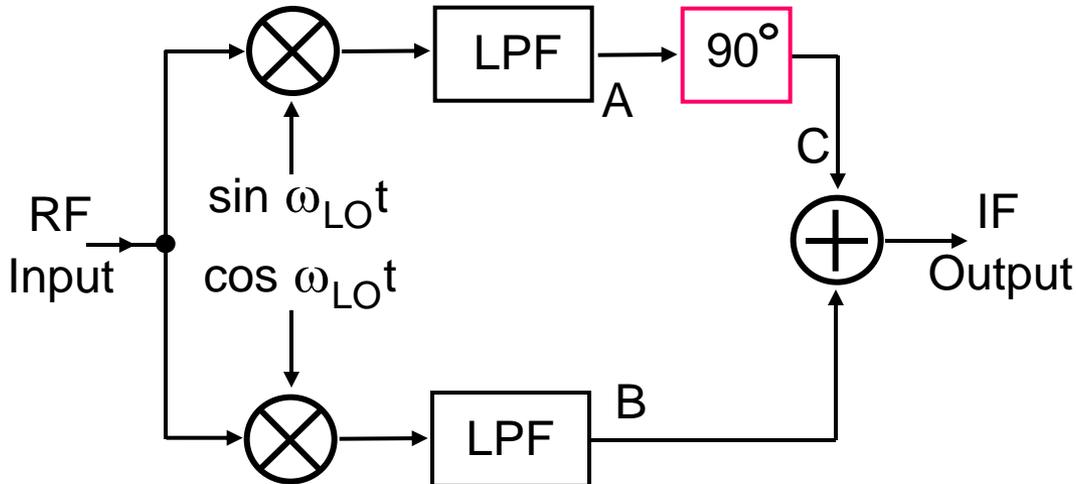


CR-Hochpaß $+45^\circ$ bei Zeitkonstante τ



RC-CR-Schaltung

Beispiel RC-CR-Schaltung bei Image Rejection Mixer und LO-I/Q-Erzeugung:



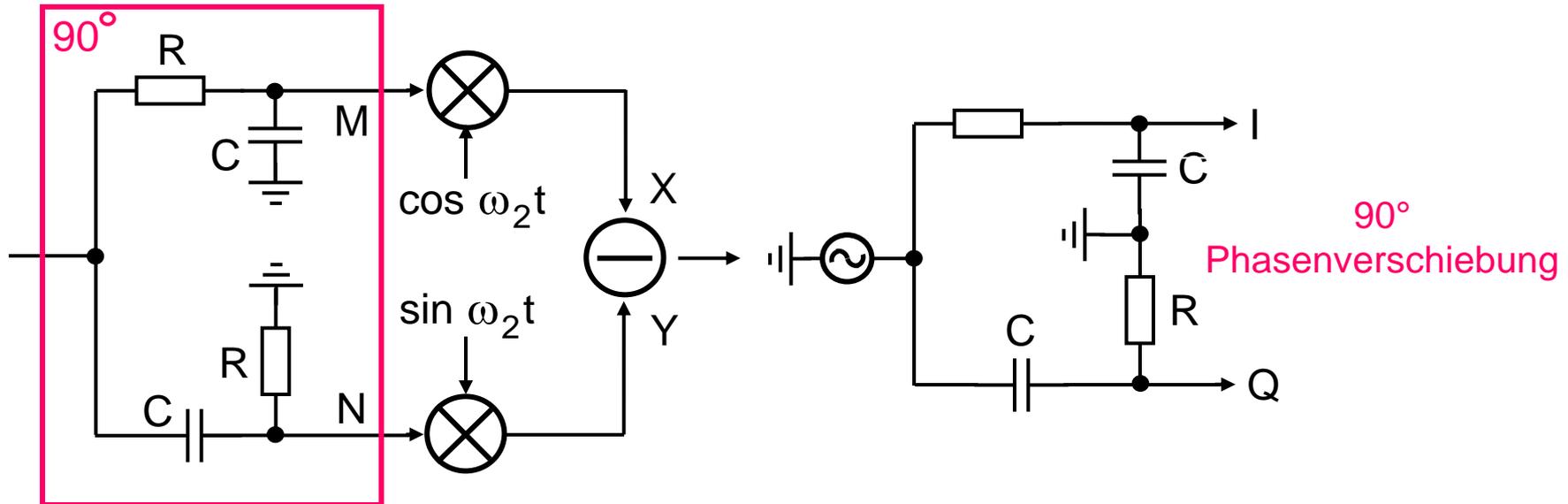
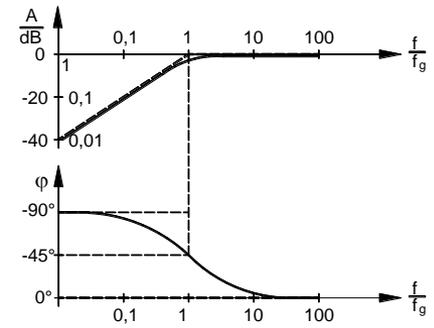
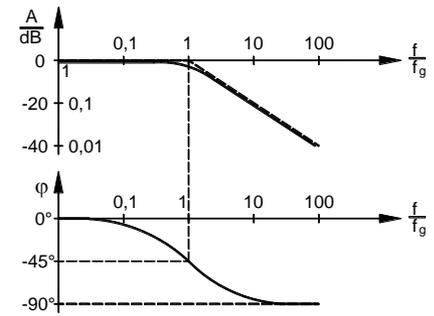
RC-CR-Schaltung

RC-CR-Netzwerk zur 90°-Verschiebung:

- einfache Schaltung

bei gleicher Grenzfrequenz:

- 90°-Verschiebung für alle Frequenzen
- gleiche Verstärkung für eine einzige Frequenz gültig
- Matching-Abhängigkeit



Gliederung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ↳ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ↳ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ↳ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ↳ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ↳ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ↳  Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Prinzip Transceiver ohne SAW-Filter?

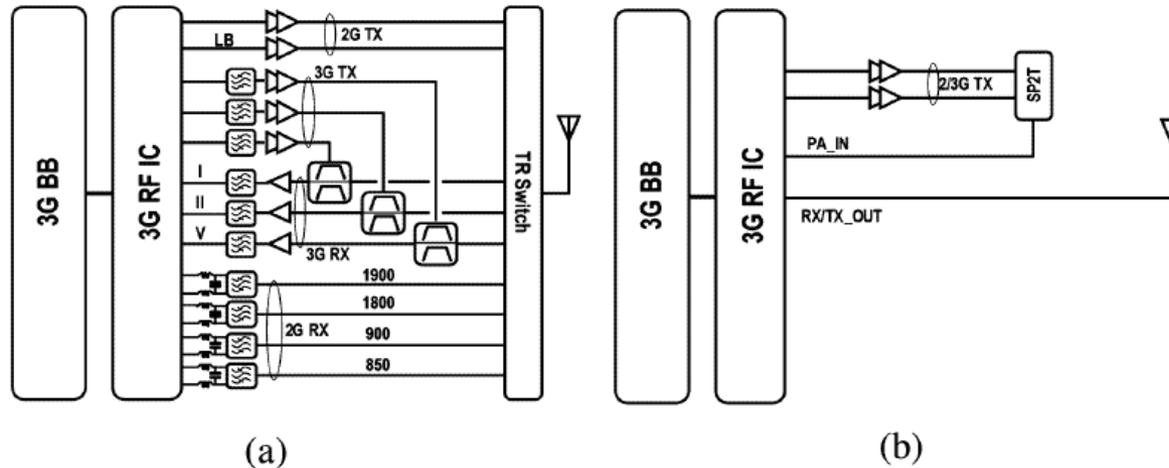


Fig. 7. Examples of (a) current and (b) future 3G radios.

An example of a quad-band GSM/EDGE tri-band WCDMA radio is shown in Fig. 7(a), where as many as 10 SAW filters, three duplexers, and several matching components are needed.

besser für Linearität:

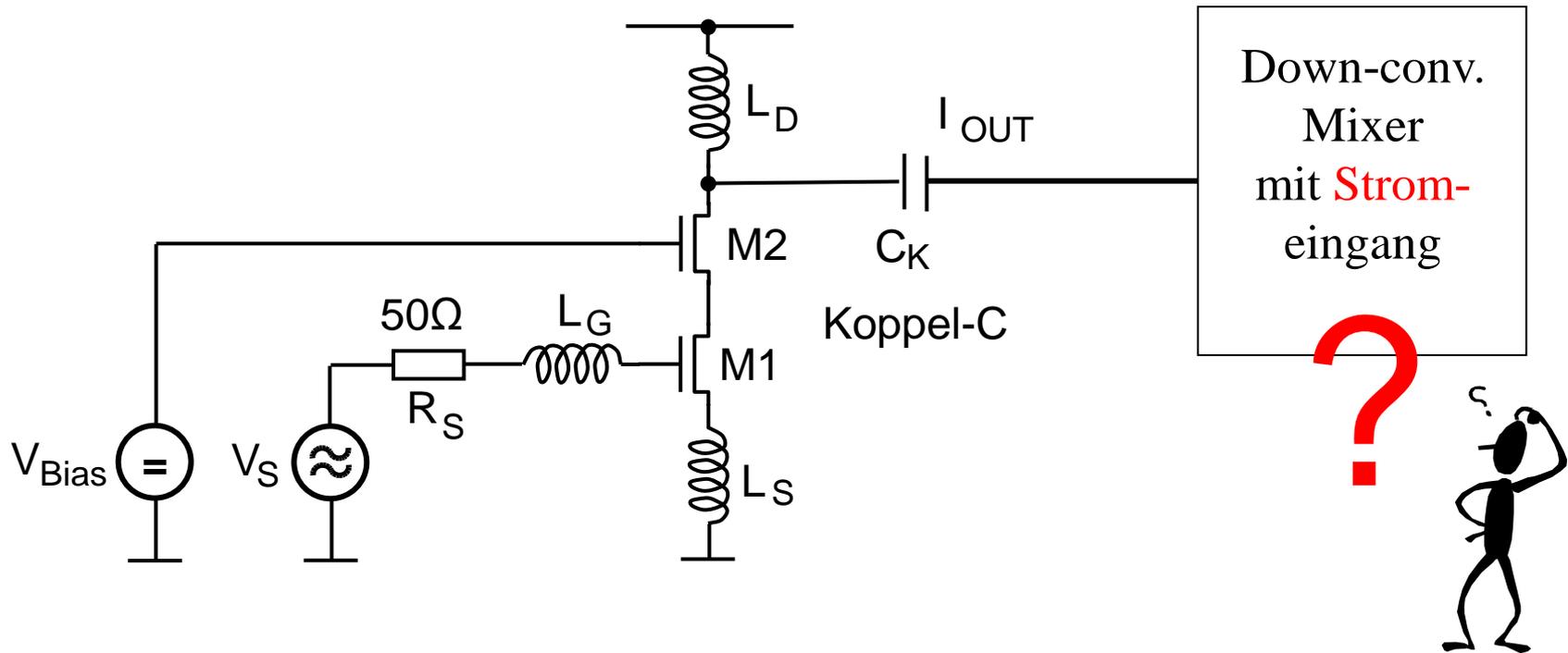
so wenig Spannung/Strom und Strom/Spannung Umwandlung
wie möglich !!



Prinzip LN_{TA} (Transconductance) "G_m-Amplifier"

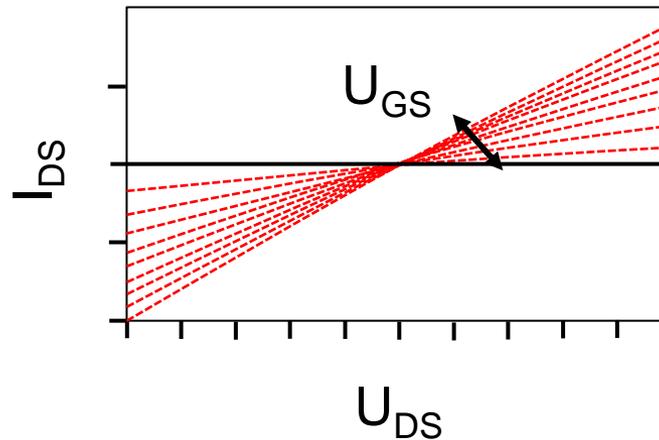
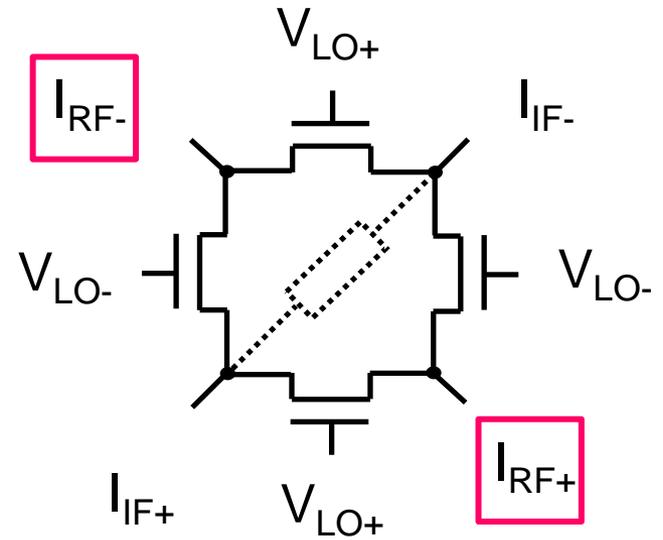
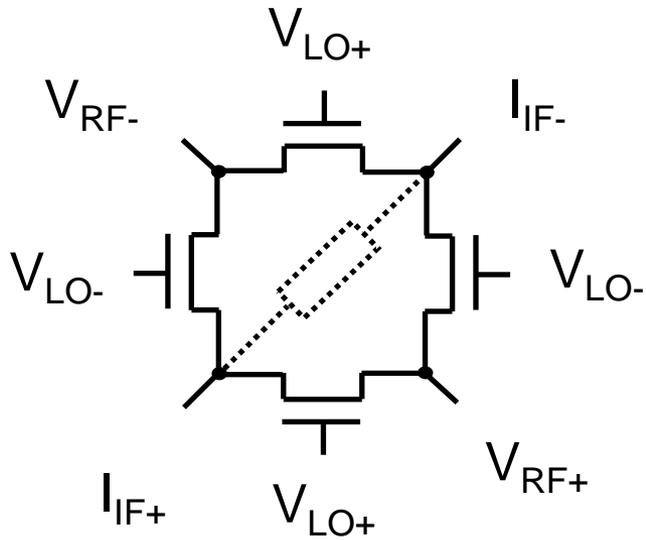
Spannung $V_S \Rightarrow$ Drain-Strom

über $G_{m,eff}$

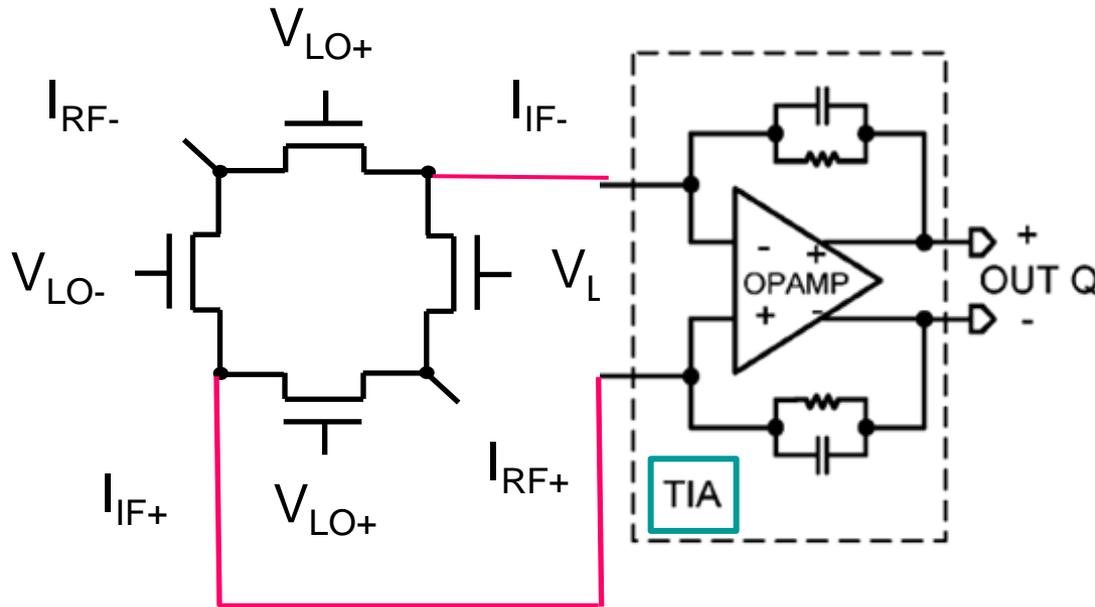
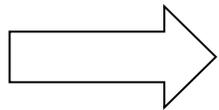
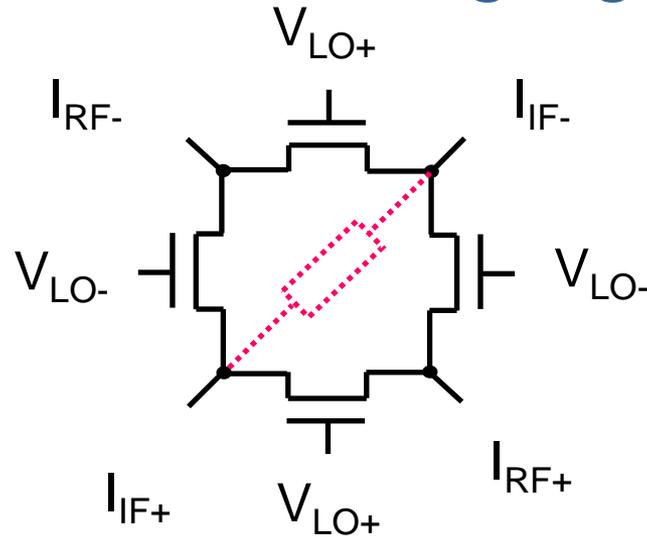


Ring-Mixer

RF-Eingang: Strom vs Spannung

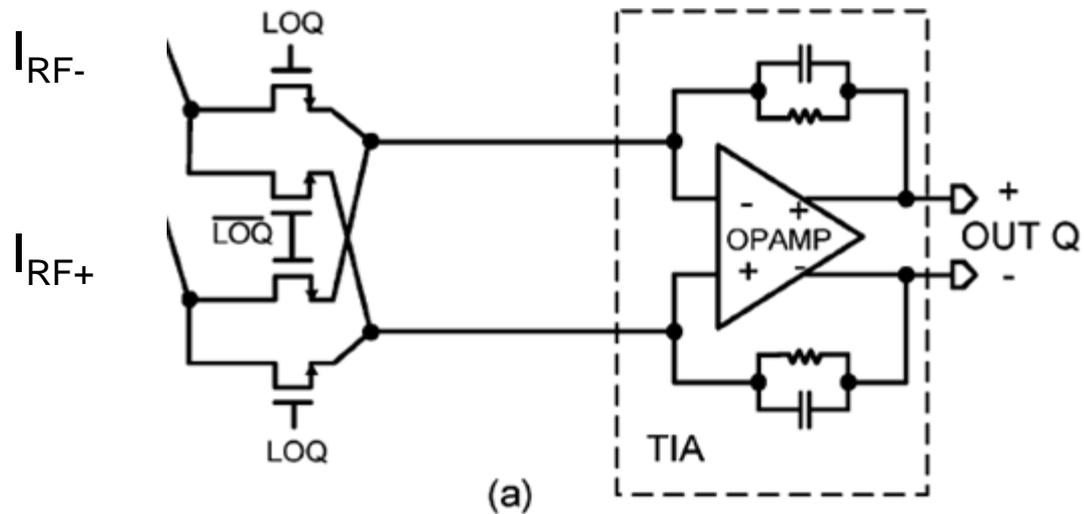
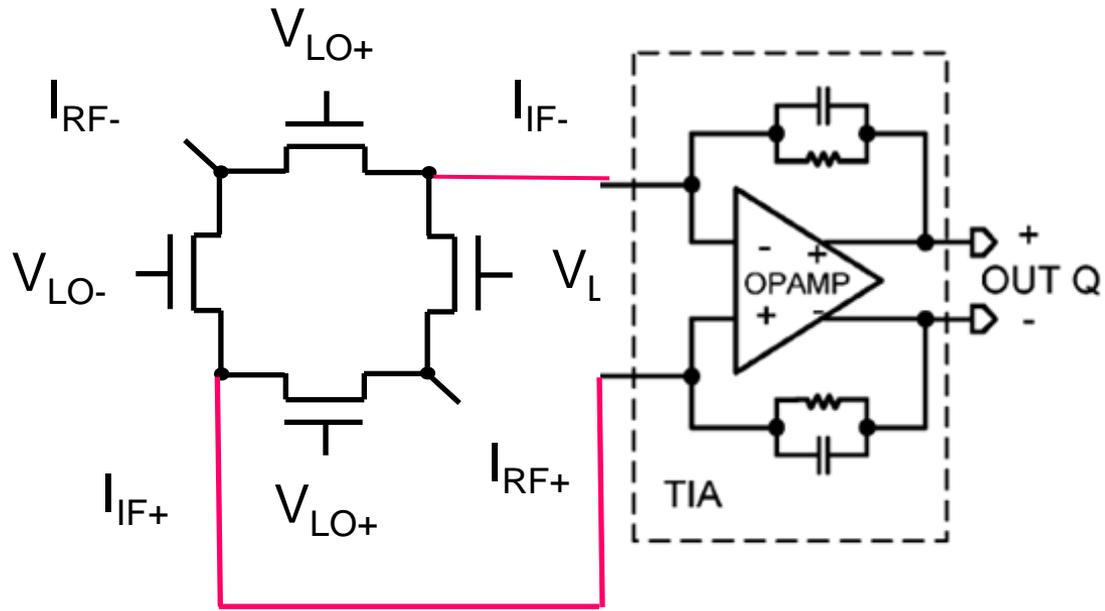


Ring-Mixer mit Strom-Eingang

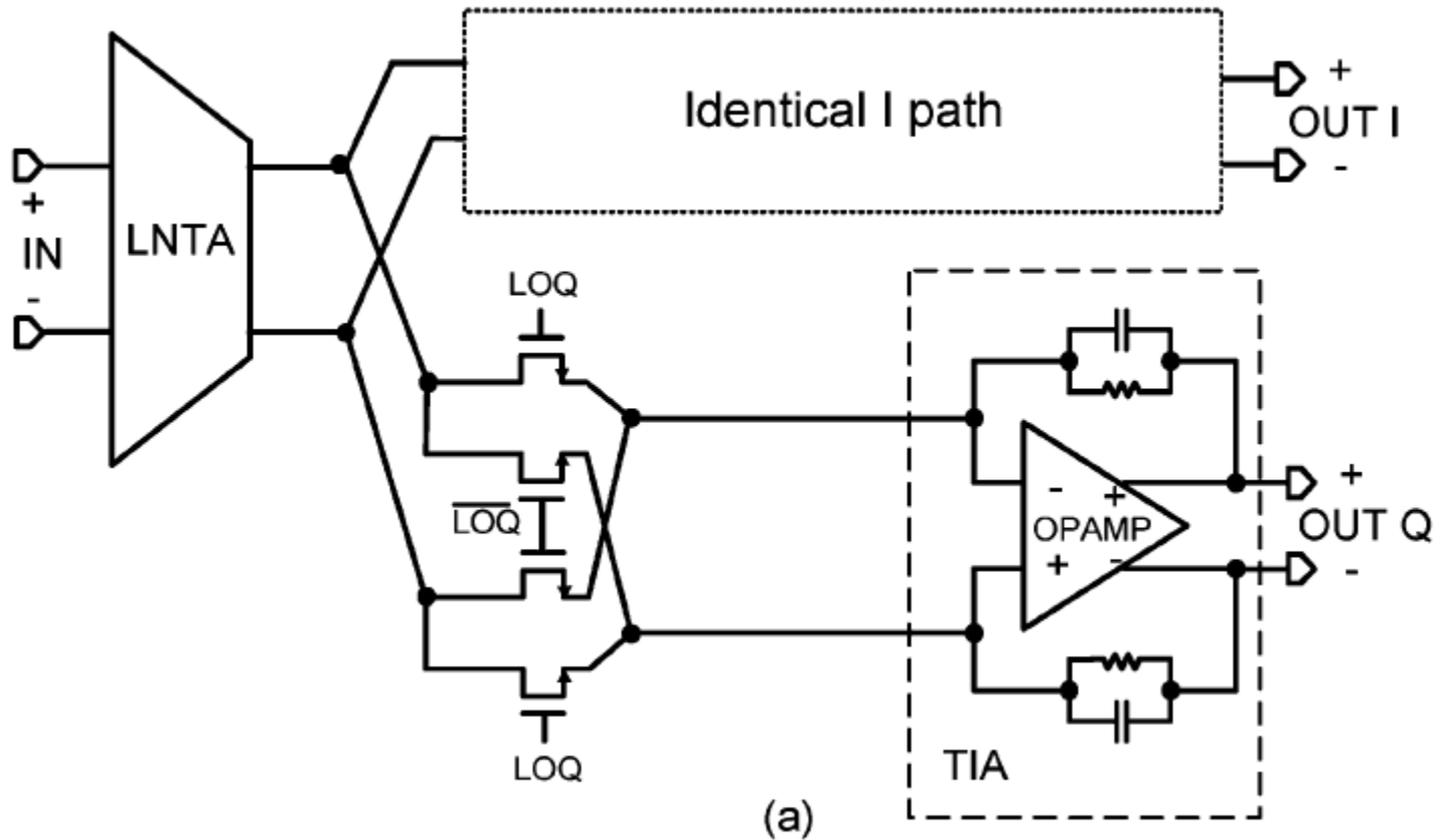


TIA:
TransImpedance
Amplifier
(Transimpedanz-
verstärker)
+ Filterung
Additions-
frequenz

Ring-Mixer mit Strom-Eingang



Passiver Mixer



TIA: TransImpedance Amplifier
(Transimpedanzverstärker)



Passiver Mixer

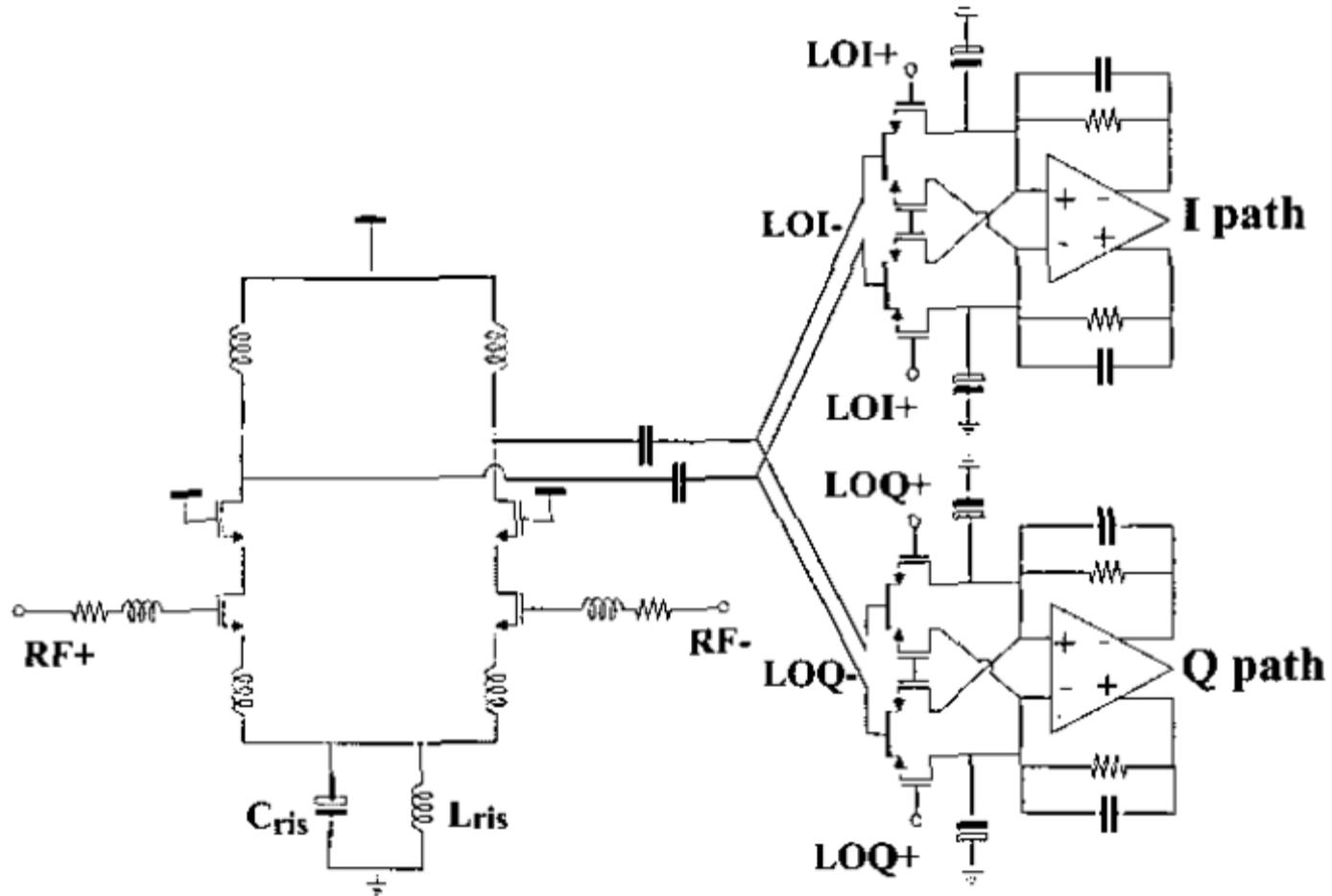
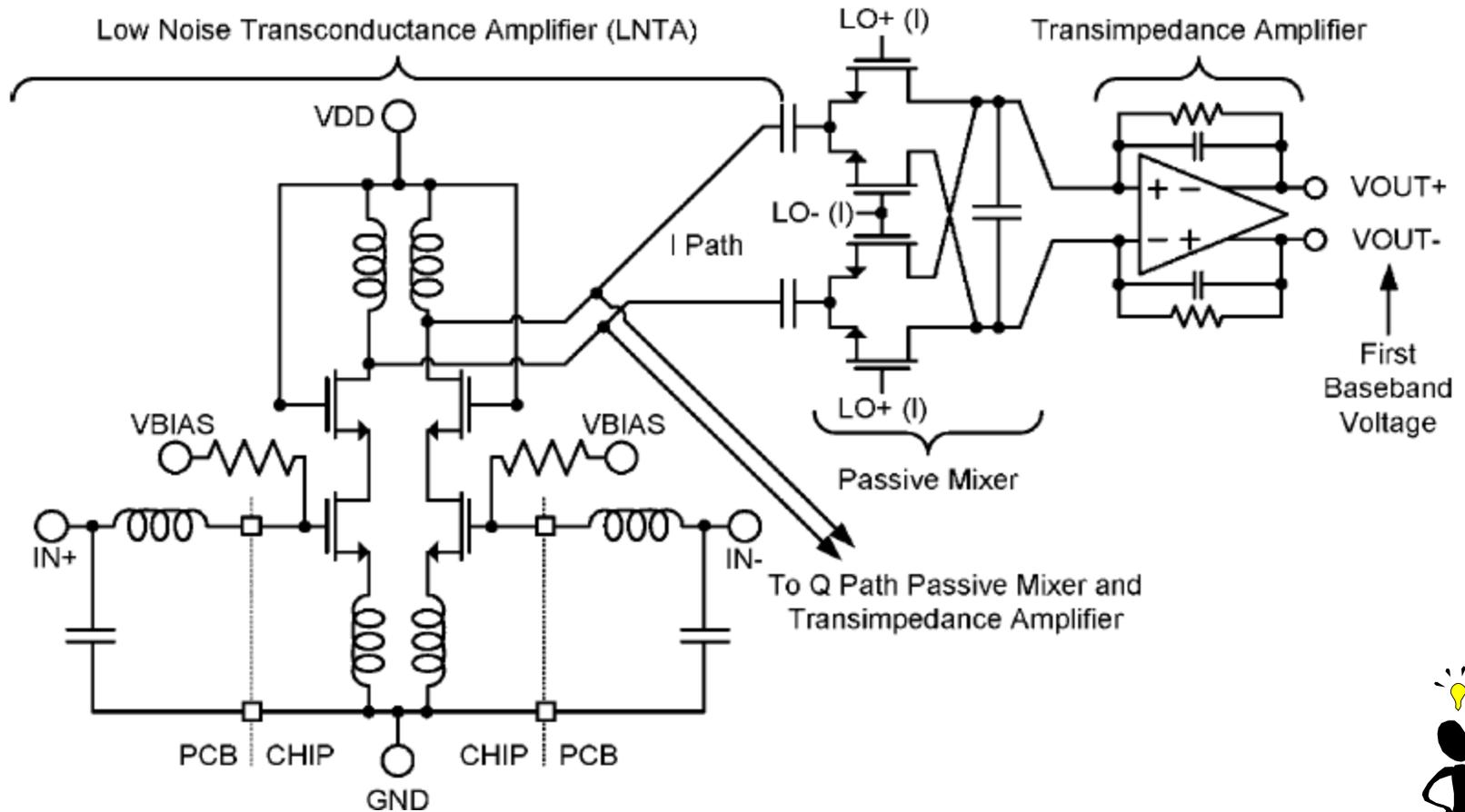


Figure 2. LNA + I&Q Mixers + First Filtering Stage



Passiver Mixer



Zusammenfassung

- Problemstellung
- Mixerschaltungen
 - ☞ Nichtlinearitäten als Mixer
 - ☞ Multiplizierer-Mixer: „Verstärker“-Mixer, Gilbert-Mixer
 - ☞ Lineare Mixer, Ring-Mixer
 - ☞ auf anderen Effekten basierende Mixer
 - ☞ Image-Reject-Mixer, Single-Sideband-Mixer
 - ☞ Mixer mit Stromeingang
- Zusammenfassung
- Literaturverzeichnis

Literaturhinweise

Bücher:

- Stephen A. Maas, „Microwave Mixers“ ,Artech, 1993, ISBN 0-89006-605-1
- B. Razavi, „RF Microelectronics“ ,Prentice Hall, 1998, ISBN 0-13-887571-5
- T.H.Lee, „The design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits“, Cambridge University Press, 1998, ISBN 0-521-63922
- Agilent DesignSeminar „Fundamentals of Mixer Design“ und „RFIC MOS Gilbert Cell Mixer Design“
- Asad A.Abidi, „Short Course on Mixer Design“
- viele Mixer-Veröffentlichungen