

Vortrag über die Masterarbeit

*Aufbau und Untersuchung einer
Verstärkerschaltung mit
kartesischer Rückkopplung*

von Ouajdi Ochi

*Fachgebiet Hochfrequenztechnik
Prof. Dr-Ing. K.Solbach*

Montag, 7.
Oktober 2013

Universität Duisburg Essen

Fachgebiet Hochfrequenztechnik

Inhalt

- ❖ *Motivation*
- ❖ *Cartesian Feedback*
- ❖ *Entwurf der Teilschaltungen*
- ❖ *Simulation*
- ❖ *Stabilitätsbetrachtung*
- ❖ *Realisierung und Messergebnisse*
- ❖ *Zusammenfassung*

• *Motivation*

• *Cartesian Feedback*

• *Entwurf der
Teilschaltungen*

• *Simulation*

• *Stabilitätsbetrachtung*

• *Realisierung und
Messergebnisse*

• *Zusammenfassung*

Magnetresonanztomographie MRT:

- ❖ **Nichttoxische Bildgebungsmodalität**
- ❖ **Beruhrt auf Magnetfelder**
- ❖ **Nicht invasiv**
- ❖ **Höhere Bildauflösung**



Quelle: Siemens

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Schichtaufnahme eines bestimmten Körperregions

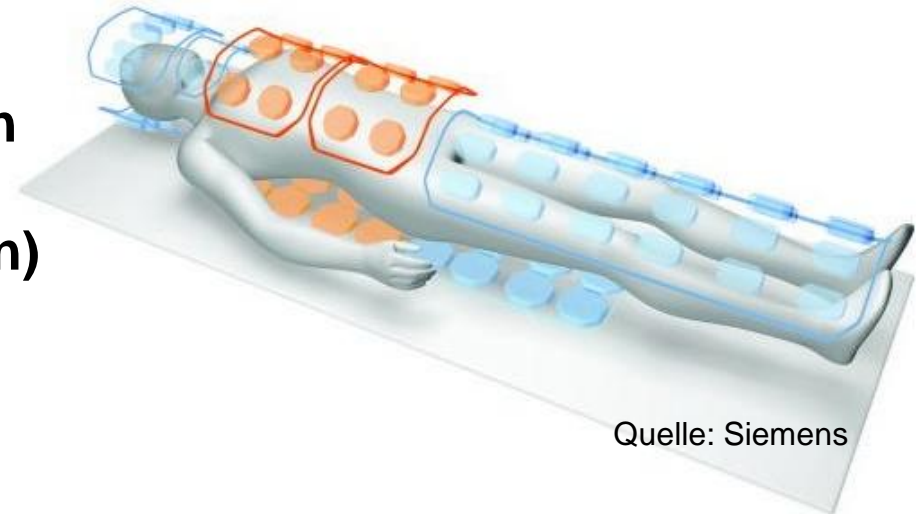
- ❖ Anregung zusätzlicher Magnetfelder durch Magnetspulen
- ❖ gepulster Leistungsverstärker speisen die Magnetspulen mit Hochfrequenzstrom ein.

Anforderungen:

- ❖ Homogene Anregung
- ❖ Erzeugung und Detektion eines Magnetfeldes (Sende-/ Empfangsspulen)

Probleme:

- ❖ Verzerrungen
- ❖ Fehlanpassung an Sender/Empfänger



Quelle: Siemens

- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

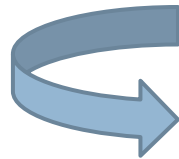
- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

Lösung:

Verstärkerausgang muss angepasst werden



Einsetzen von Linearisierungsverfahren

Bekannte geeignete Technik:

Kartesische Rückkopplung (engl.: Cartesian Feedback)

- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

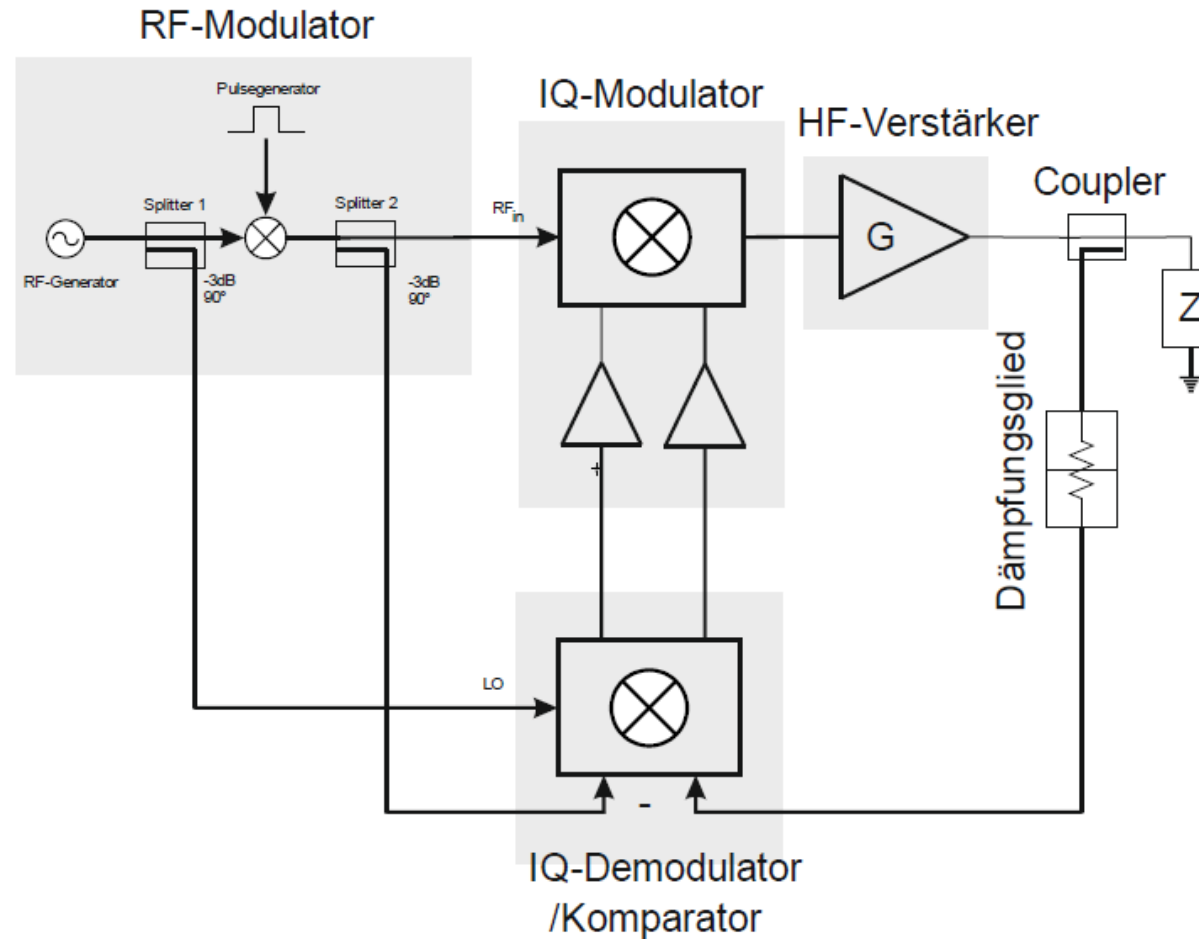
- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

Blockschaltbild:



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Funktionsweise:

- 1) Vergleich zwischen Eingangs- und Ausgangssignal:
Bildung eines Fehlersignals
- 2) Zerlegung des Fehlersignals in seinen kartesischen
Komponenten I und Q (Quadraturkomponenten)
Frequenz um Null Hz
- 3) Tiefpassfilterung und Verstärkung
- 4) Steuerung des IQ-Modulators: Anhebung, Absenkung
und/oder Phasenverschiebung des Eingangssignals
- 5) Ausgangssignal wird kontinuierlich korrigiert

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Vorteile:

- ❖ Regelung der gesamten Strecke
- ❖ Moderate Komplexität

Nachteile:

- ❖ Stabilitätsproblem (Schaltung mit Rückkopplung)

Die Hauptkomponenten der kartesischen Rückkopplung:

- ❖ IQ-Modulator
- ❖ IQ-Demodulator/Komparator
- ❖ RF-Modulator
- ❖ 10W-Leistungsverstärker

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

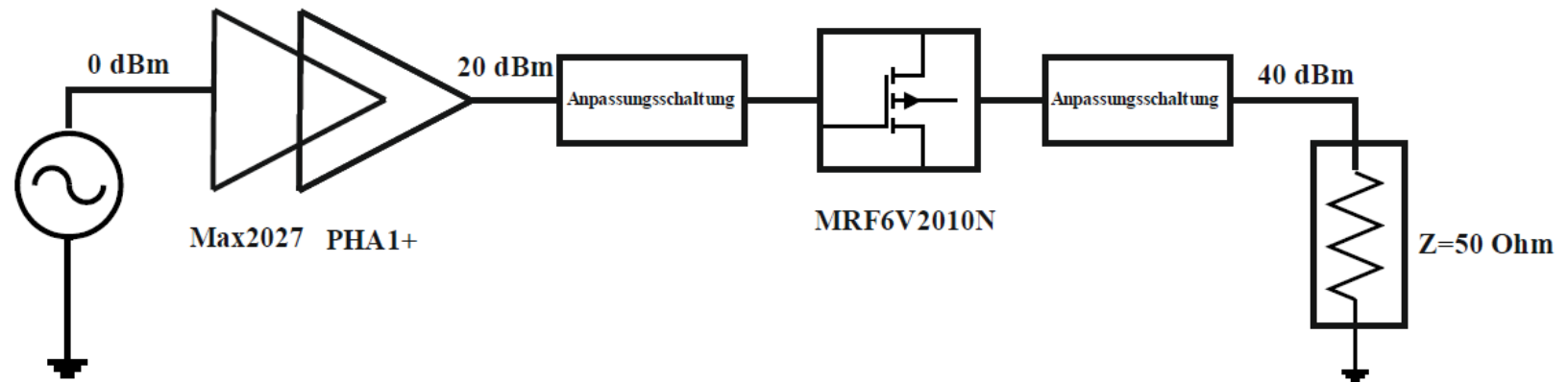
•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Der 10W-Leistungsverstärker:

Topologie:



3 Stufenverstärker:

- 1) IC Max2027
- 2) PHA1+ (Zwischenstufe)
- 3) MOSFET MRF6V2010N (Endstufe)

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Für Endstufe:

- ❖ Load Pull Analyse zur Bestimmung des Eingangs- und Ausgangsimpedanzen bei 300 MHz
- ❖ Anpassungsnetzwerke optimieren

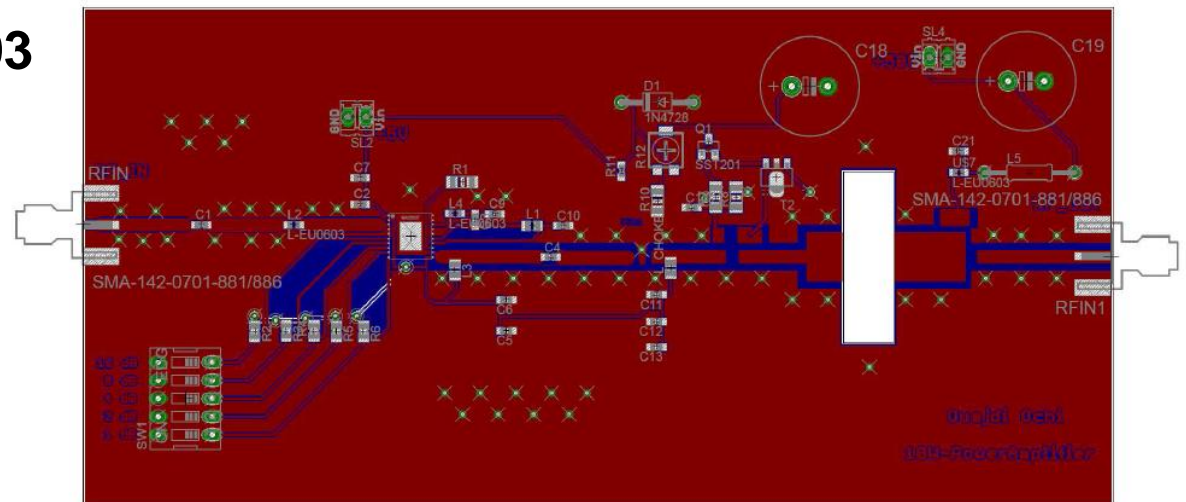
Eigenschaften der Platine

Material : RO 4003

Dicke: 0.81 mm

Länge: 145 mm

Breite: 70 mm



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

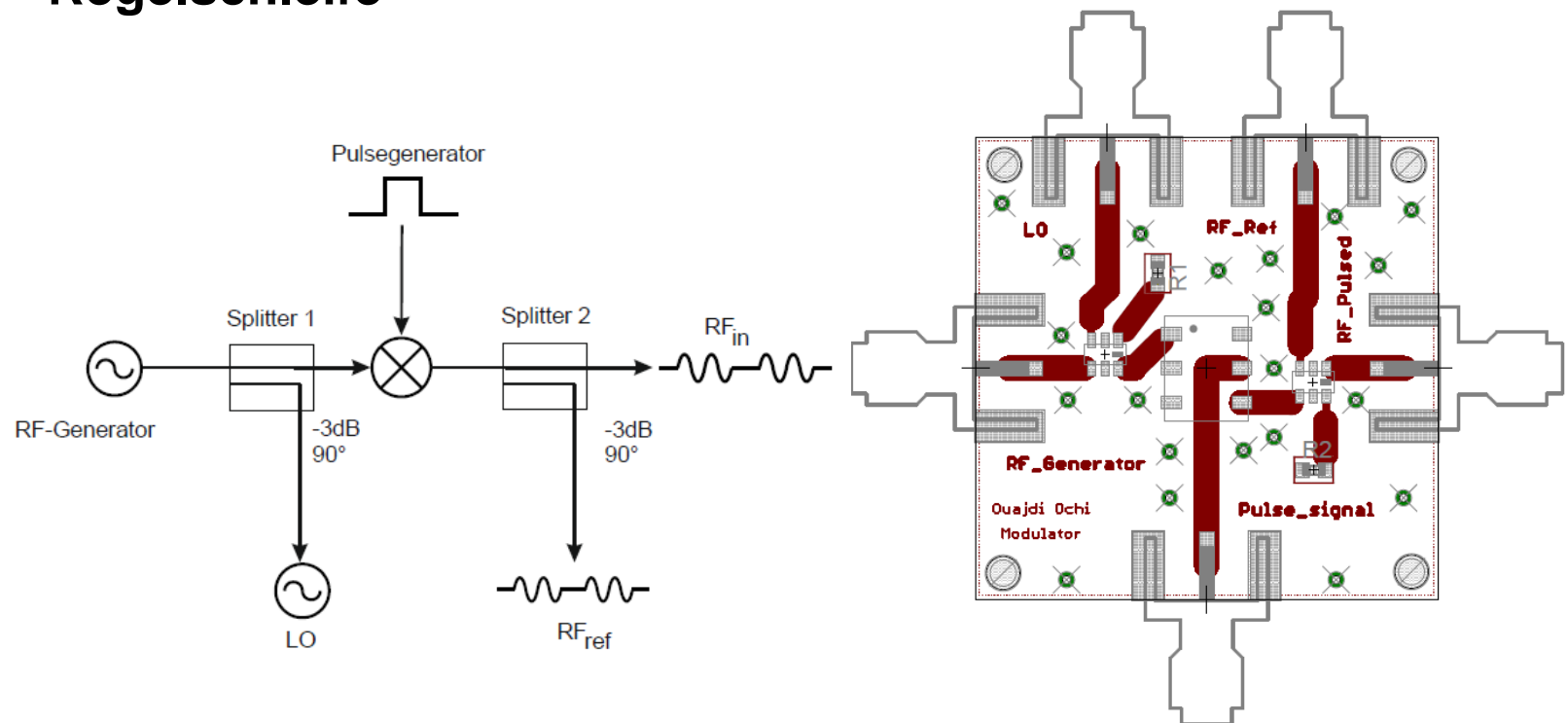
- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

RF-Modulator:

❖ Pulsmodulation und Ableitung nötiger Signale für die Regelschleife



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

Prinzip der IQ-Modulation:

$$\begin{aligned} I(t) &= A \sin(\omega_{RF}t) & LO_I(t) &= B \sin(\omega_{LO}t) \\ Q(t) &= A \sin(\omega_{RF}t + \varphi) & LO_Q(t) &= B \sin(\omega_{LO}t + \varphi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I(t) \cdot LO_I(t) &= A \sin(\omega_{RF}t) B \sin(\omega_{LO}t) \\ &= \frac{AB}{2} (\cos[(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t] - \cos[(\omega_{LO} + \omega_{RF}) \cdot t]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(t) \cdot LO_Q(t) &= A \sin(\omega_{RF}t + \varphi) B \sin(\omega_{LO}t + \varphi) \\ &= \frac{AB}{2} (\cos[(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t] + \cos[(\omega_{LO} + \omega_{RF}) \cdot t]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mod_{out} &= I(t) \cdot LO_I(t) + Q(t) \cdot LO_Q(t) \\ &= AB \cdot \cos[(\omega_{LO} - \omega_{RF}) \cdot t] \end{aligned}$$

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

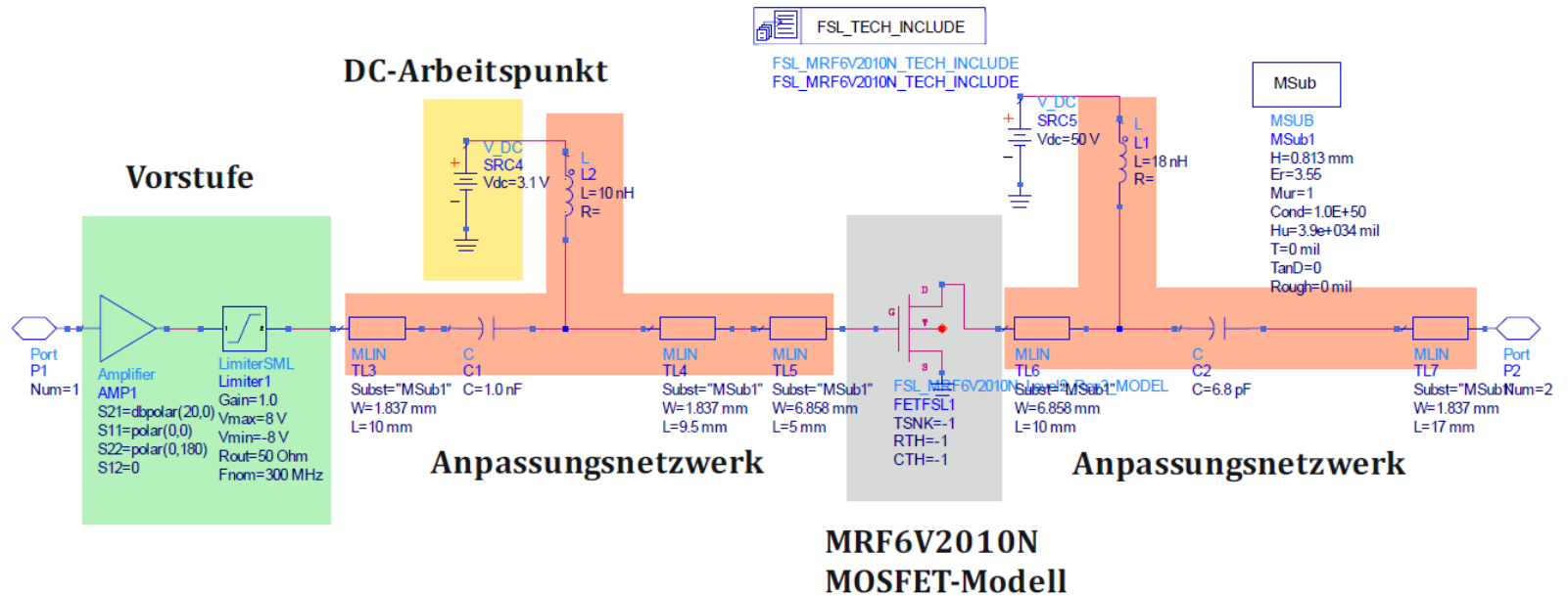
•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Das Verstärkermodell:



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

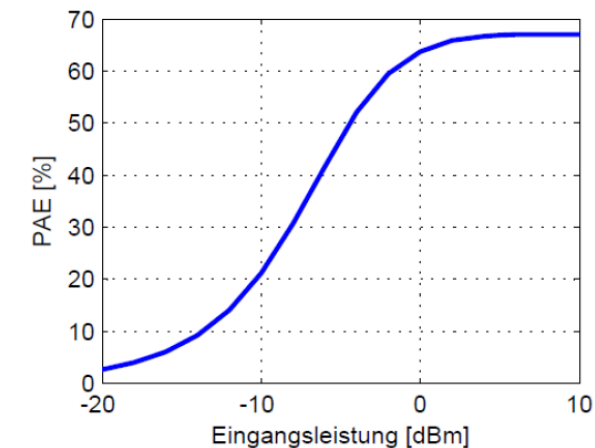
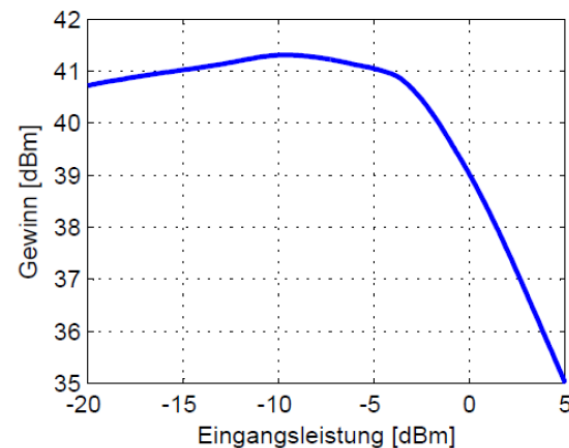
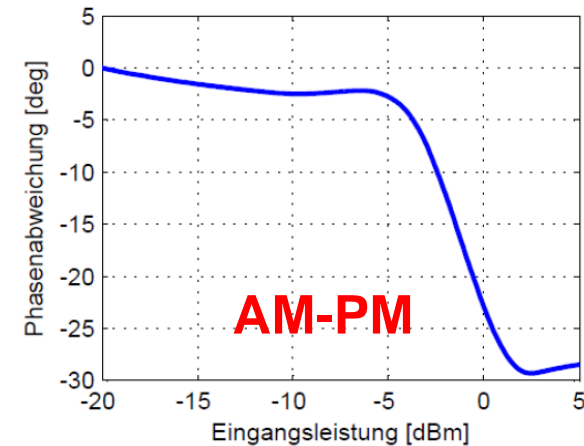
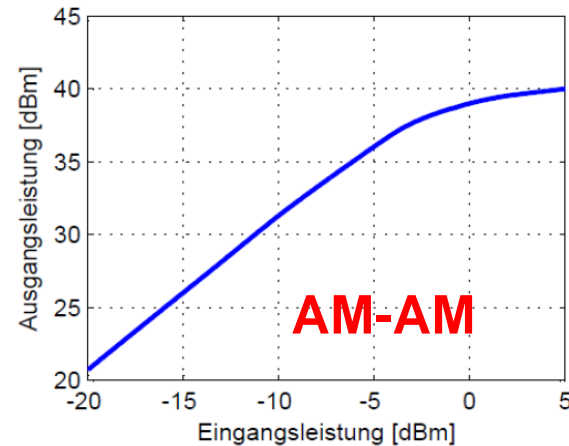
- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

➤ Charakterisierung des 10W-Leistungsverstärkers:



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

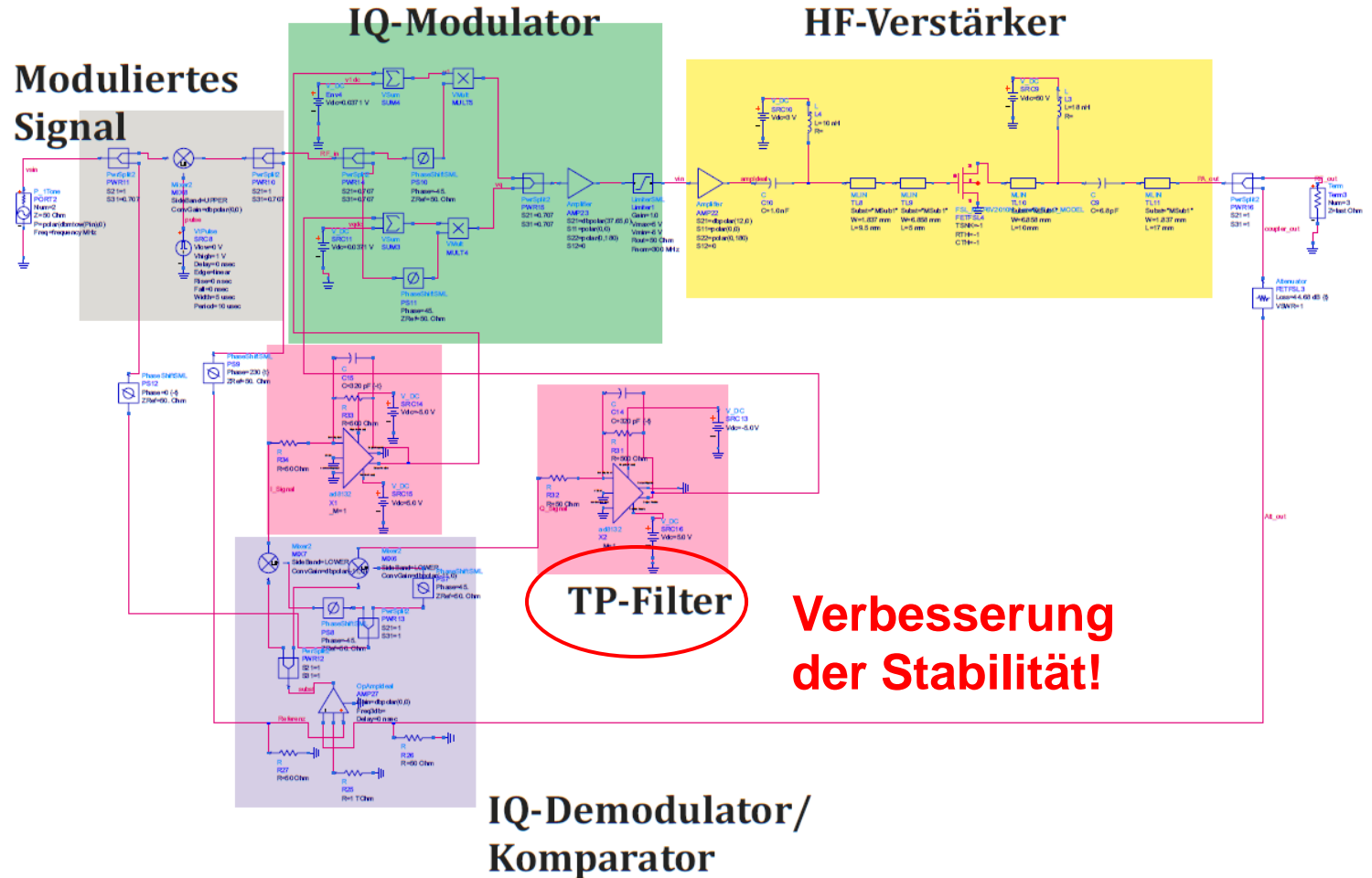
•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Simulationsmodell:



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

Linearisierung des Leistungsverstärkers:

- ❖ Zweitonsignal: 10 kHz Abstand bei 300 MHz Center Freq

Verzerrungen werden unterdrückt:

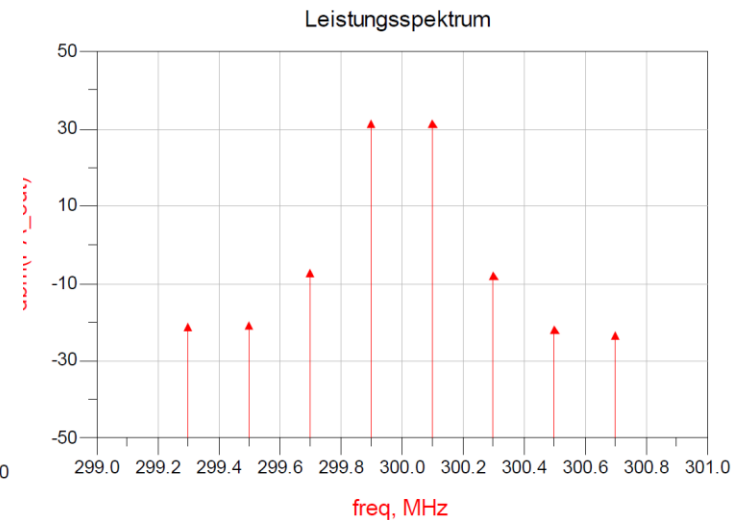
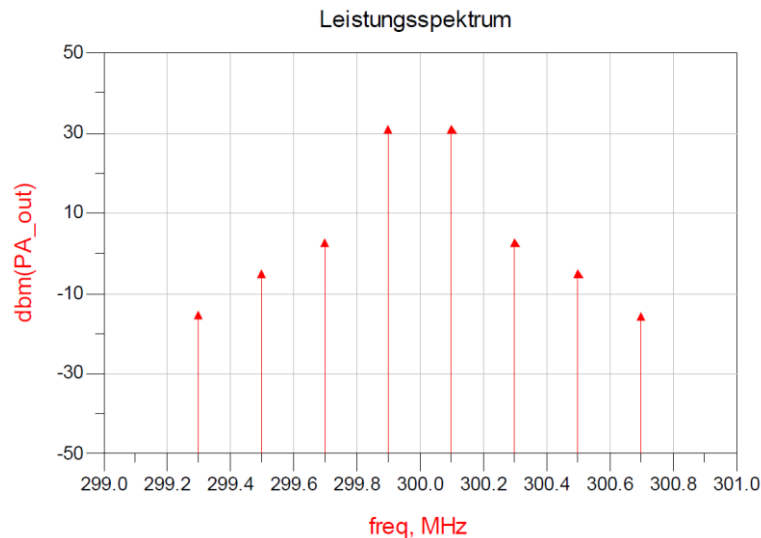
- ❖ Abstand Träger-Intermodulationsprodukte:

Open Loop: 28,46 dBm

Closed Loop: 39,51 dBm



Verbesserung: ca. 11 dBm



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

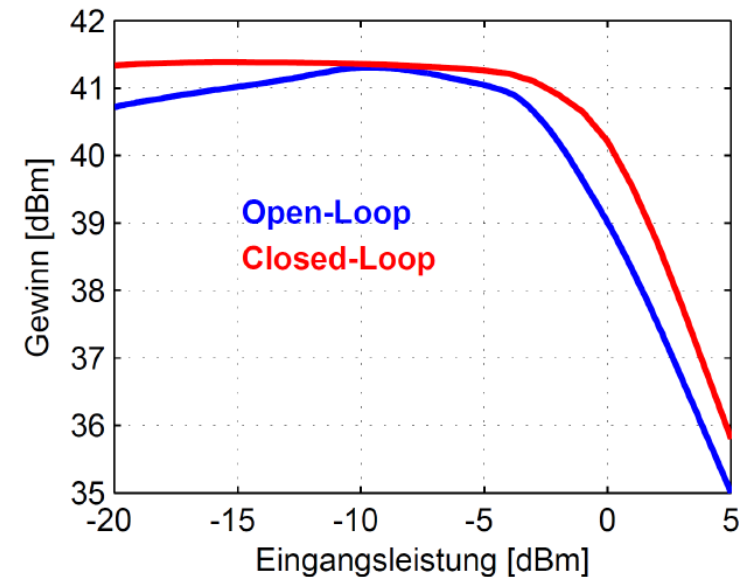
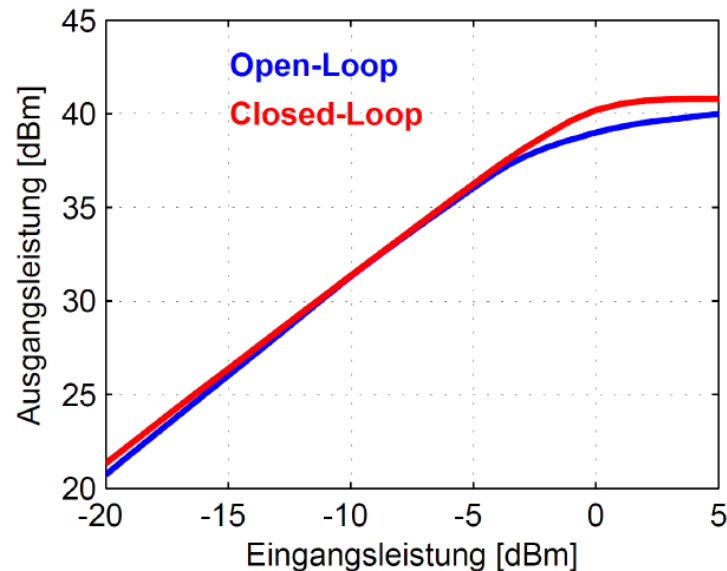
- Zusammenfassung

❖ Der 1dB-Kompressionspunkt:

Open Loop: 38,2 dBm

Closed Loop: 42,5 dBm

❖ Gewinn=41,2 dBm



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

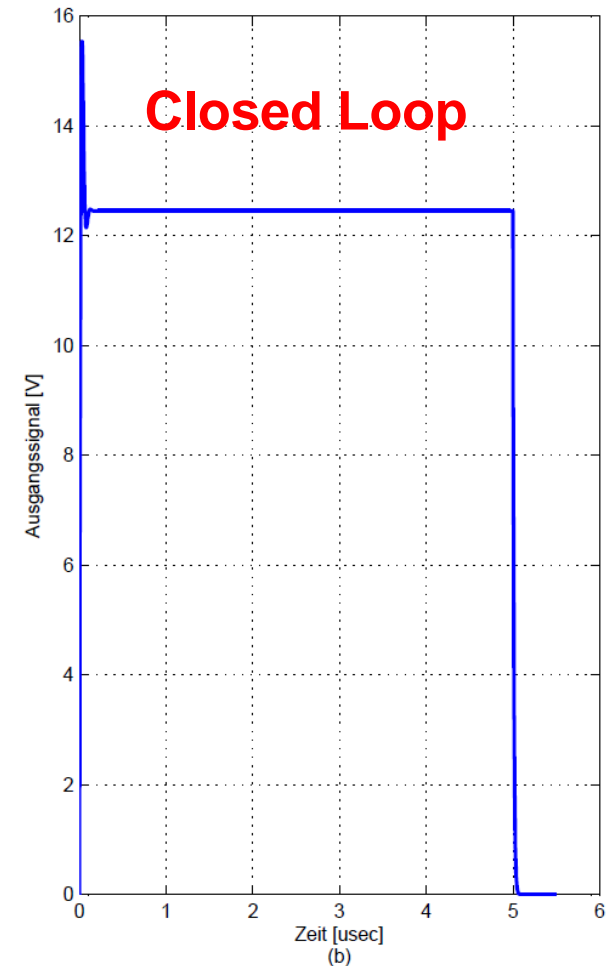
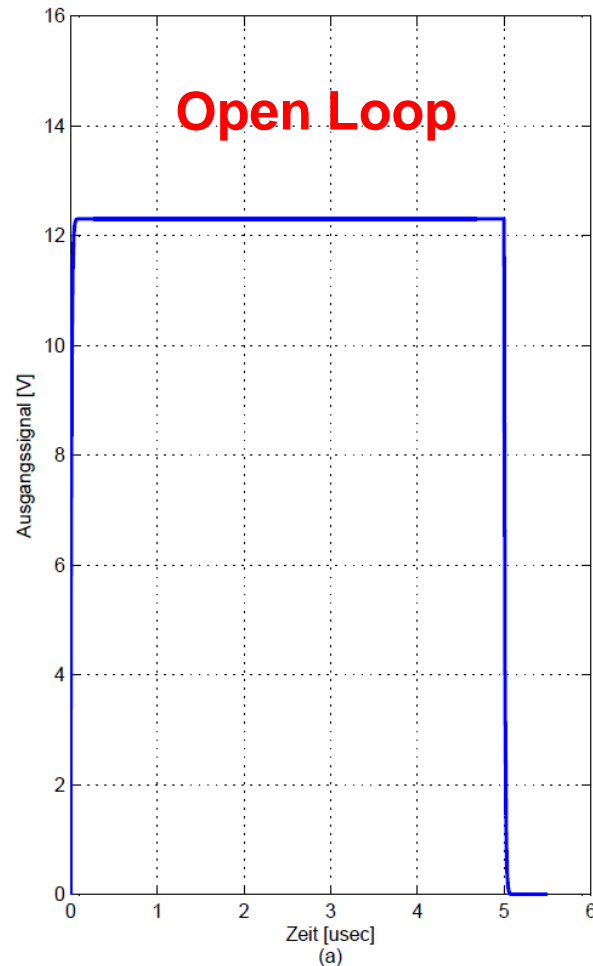
- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

➤ Korrekturverhalten der Regelschleife: 50 Ohm Zustand



- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

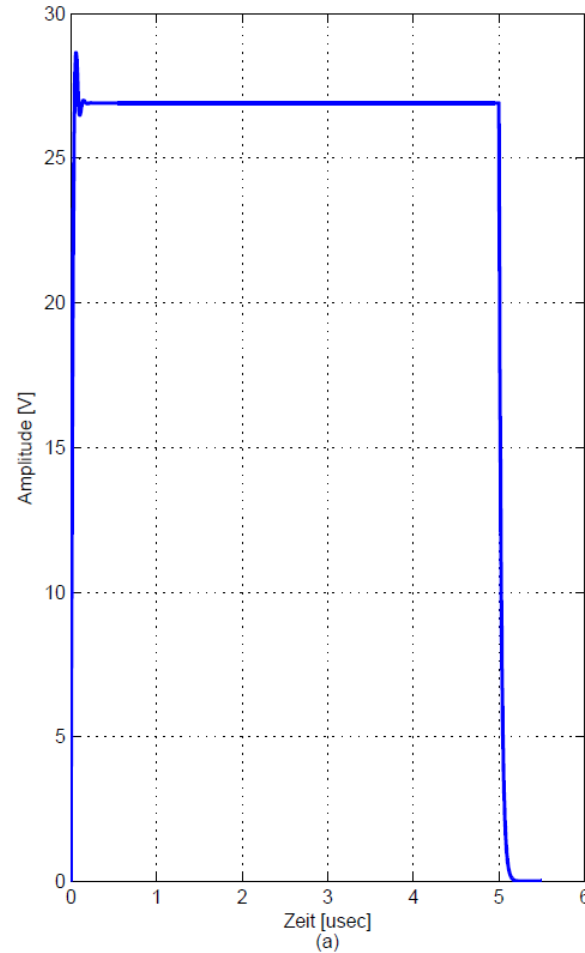
- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

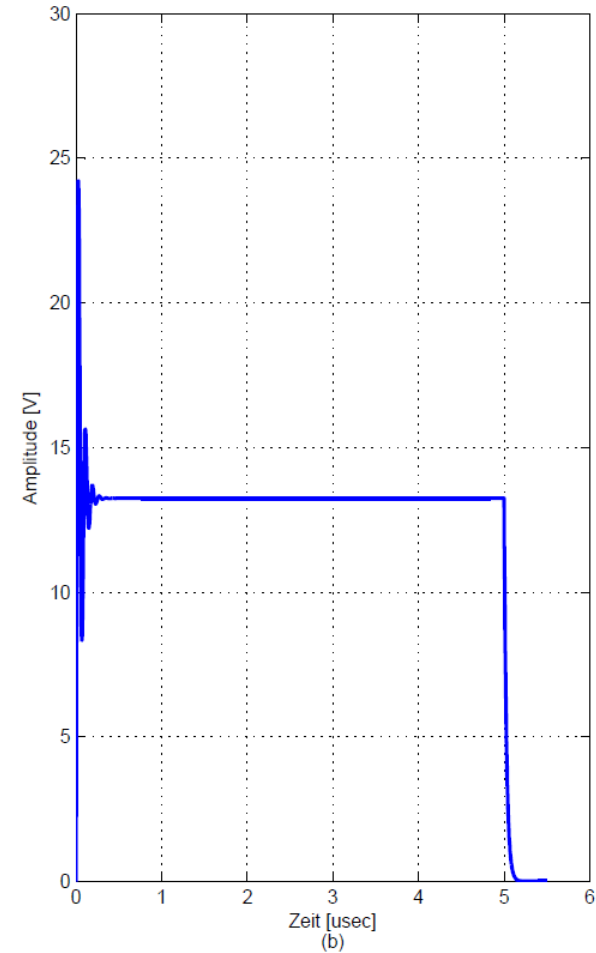
- Zusammenfassung

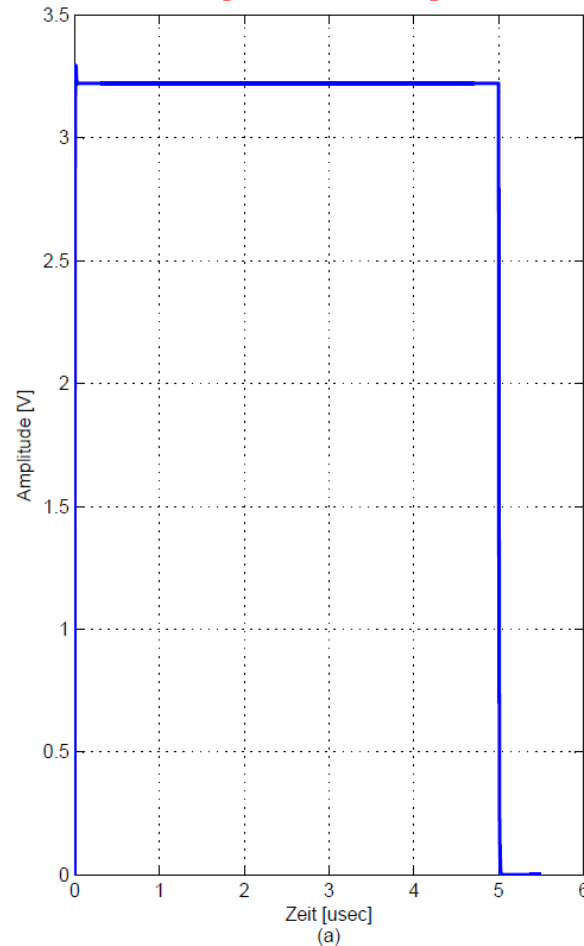
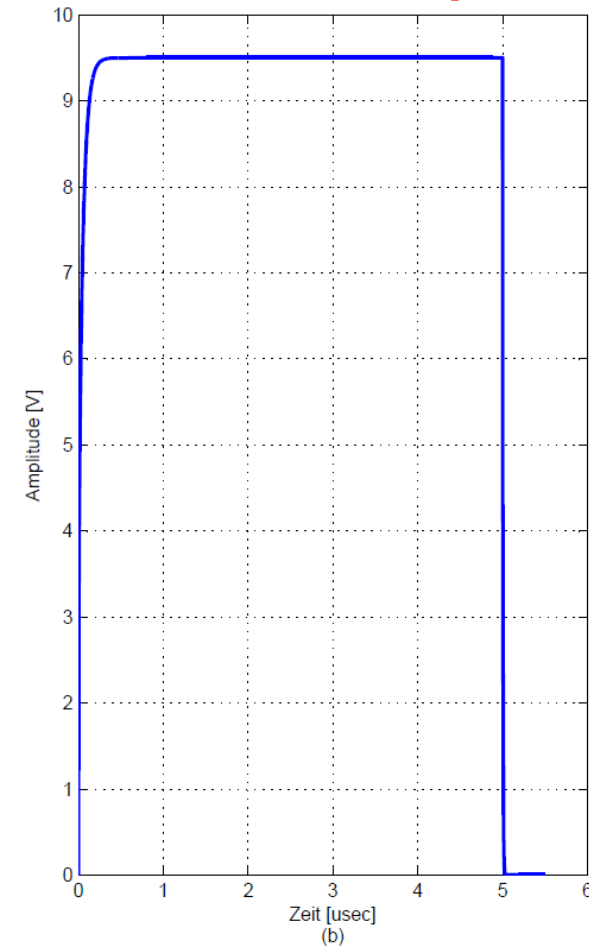
➤ **Korrekturverhalten bei 1 kOhm:**

Open Loop



Closed Loop



➤ **Korrekturverhalten bei 10 Ohm:**• *Motivation*• *Cartesian Feedback*• *Entwurf der
Teilschaltungen*• *Simulation*• *Stabilitätsbetrachtung*• *Realisierung und
Messergebnisse*• *Zusammenfassung***Open Loop****Closed Loop**

- Motivation

- Cartesian Feedback

- Entwurf der Teilschaltungen

- Simulation

- Stabilitätsbetrachtung

- Realisierung und Messergebnisse

- Zusammenfassung

Die offene Schleifenverstärkung: Wie viel Verstärkung, Dämpfung und Phasenverschiebung erfährt ein Testsignal beim Durchlaufen der kompletten Regelschleife.

➤ **Amplitudenreserve:** ist der reziproke Wert des Amplitudengangs der offenen Regelschleife bei der Phasenschnittkreisfrequenz:

$$\varphi(\omega_{\pi}) = -180^{\circ}$$

➤ **Phasenreserve:** ist die Differenz des Phasengangs der offenen Regelschleife zu -180° bei der Durchtrittskreisfrequenz:

$$|G_{OL}(j\omega_D) = 1|$$

Stabilitätsgüte : Einschwingverhalten bei einer Sprungförmigen Änderung.

➤ Bestimmung des Amplituden- und Phasengangs des offenen Regelkreises

• Motivation

• Cartesian Feedback

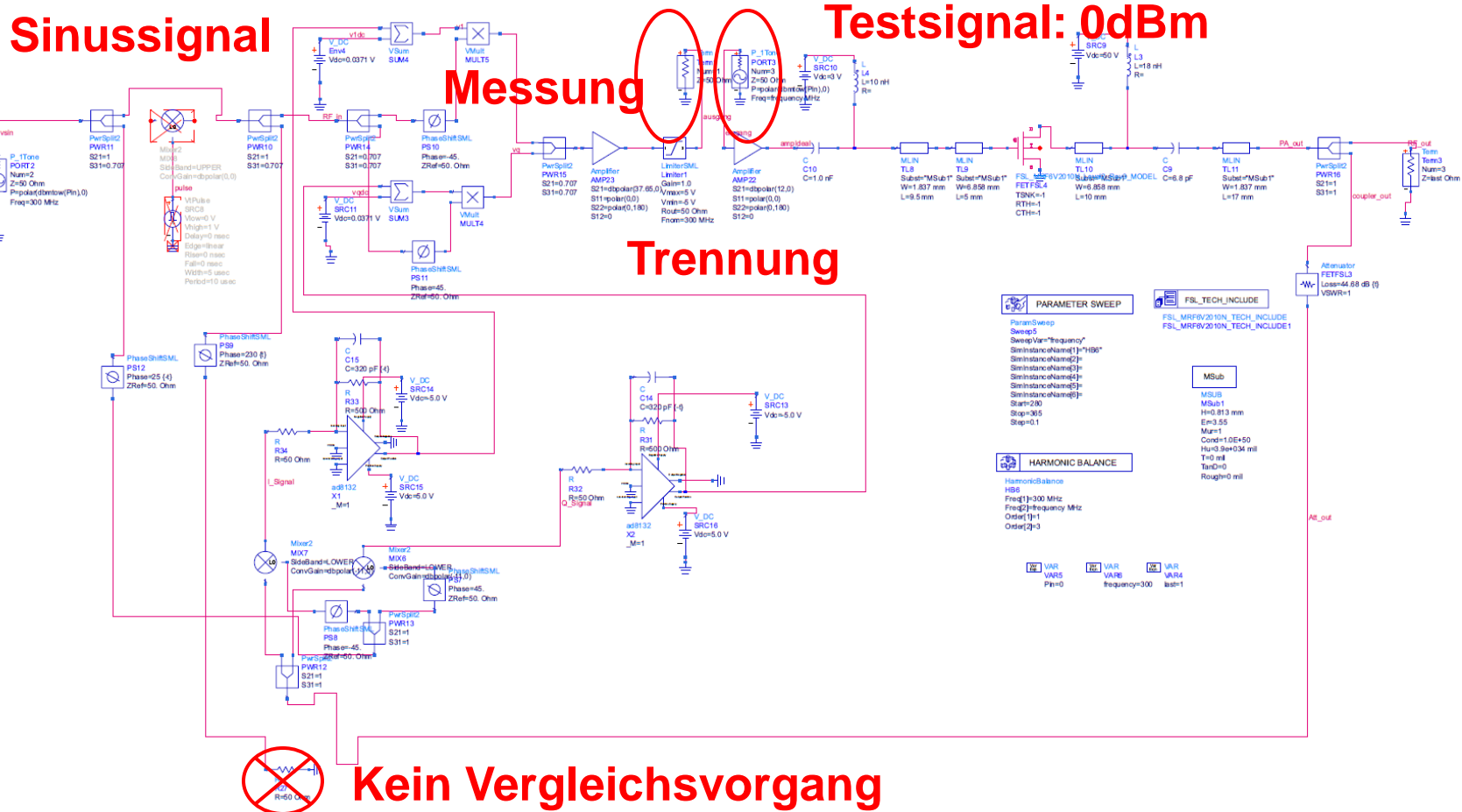
• Entwurf der Teilschaltungen

• Simulation

• Stabilitätsbetrachtung

• Realisierung und Messergebnisse

• Zusammenfassung



• Motivation

• Cartesian Feedback

• Entwurf der Teilschaltungen

• Simulation

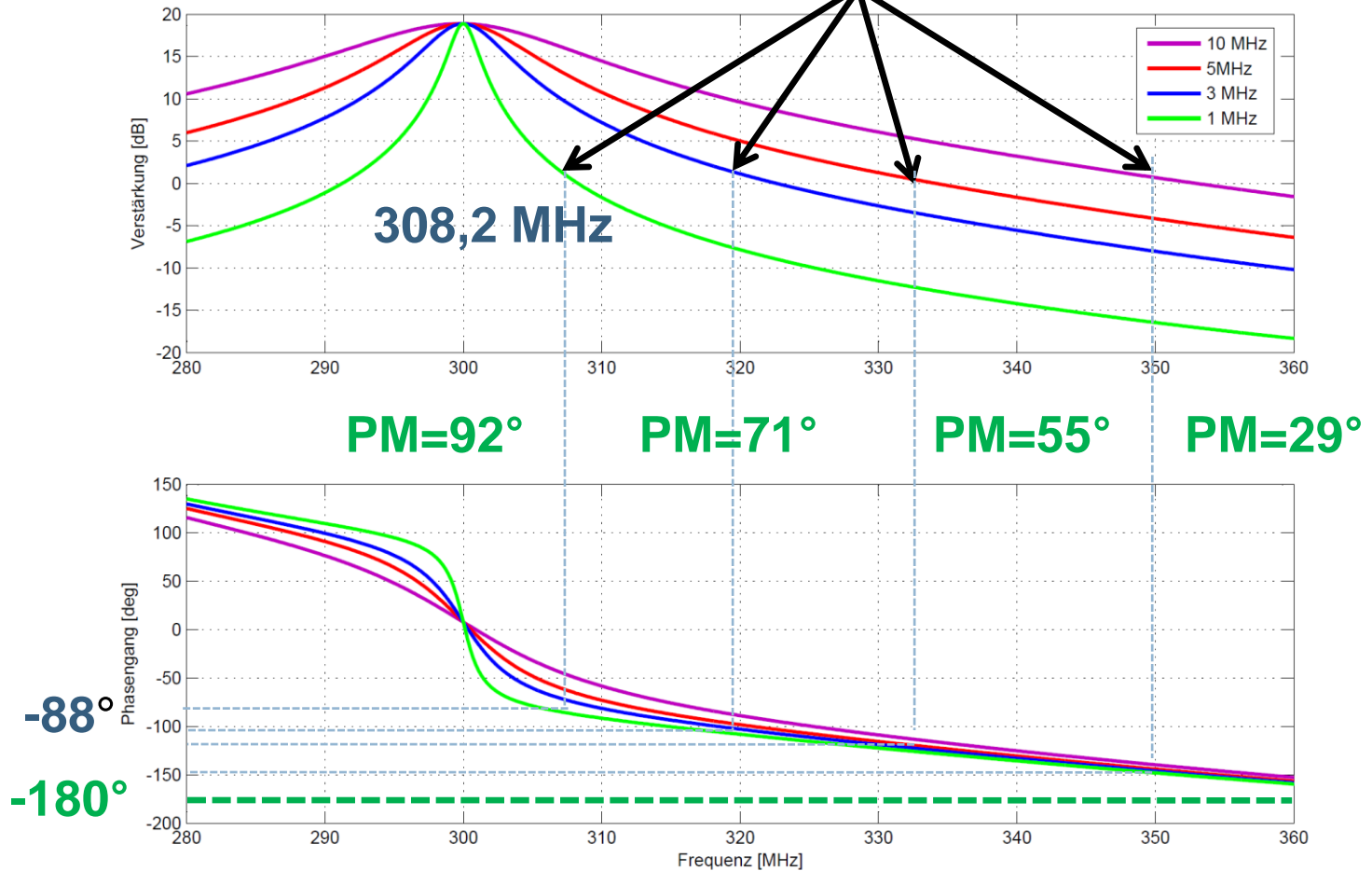
• Stabilitätsbetrachtung

• Realisierung und Messergebnisse

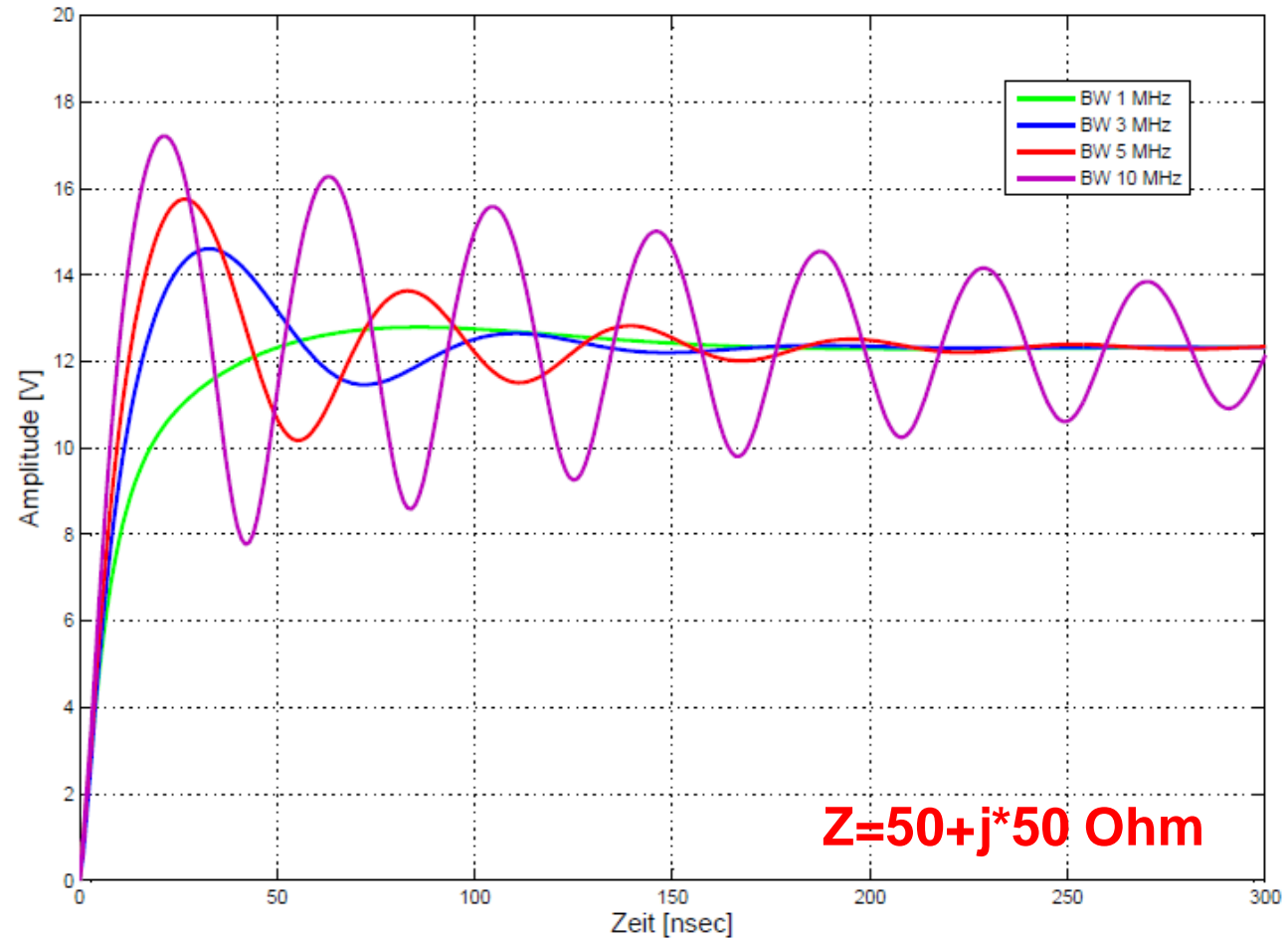
• Zusammenfassung

➤ Einfluss der Filterbandbreite:

Durchtrittskreisfrequenz



➤ Lastimpedanzen/Filterbandbreite



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Lastimpedanzen/Filterbandbreite

• Motivation

• Cartesian Feedback

• Entwurf der Teilschaltungen

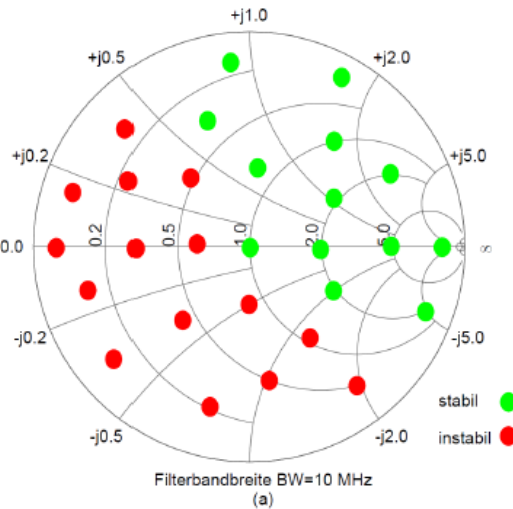
• Simulation

• Stabilitätsbetrachtung

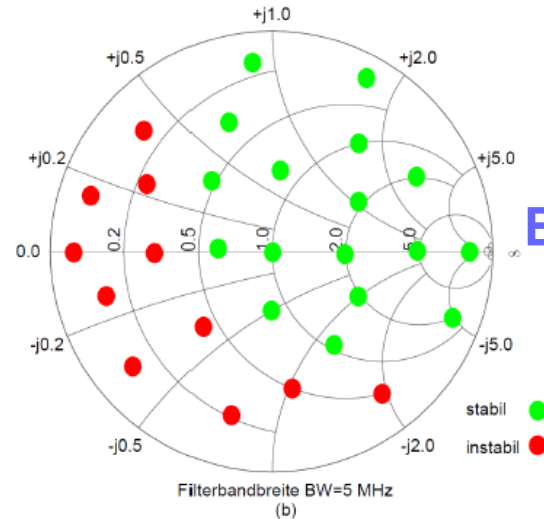
• Realisierung und Messergebnisse

• Zusammenfassung

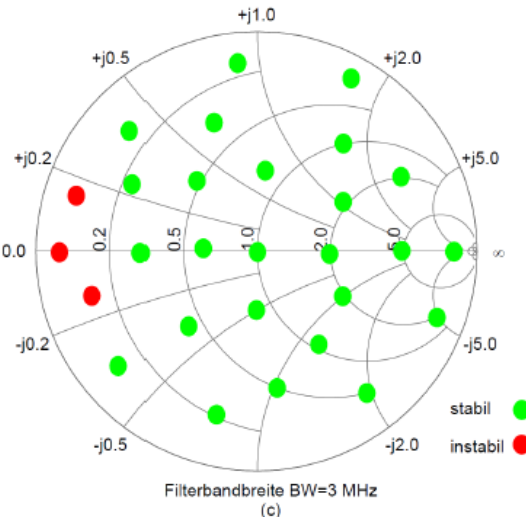
BW=10 MHz



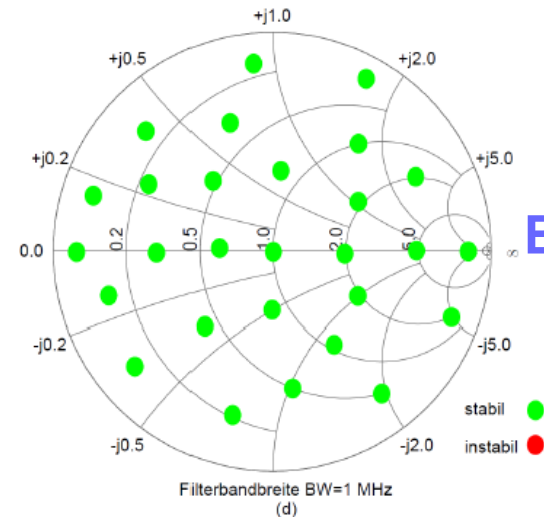
BW=5 MHz



BW=3 MHz



BW=1 MHz



• Motivation

• Cartesian Feedback

• Entwurf der Teilschaltungen

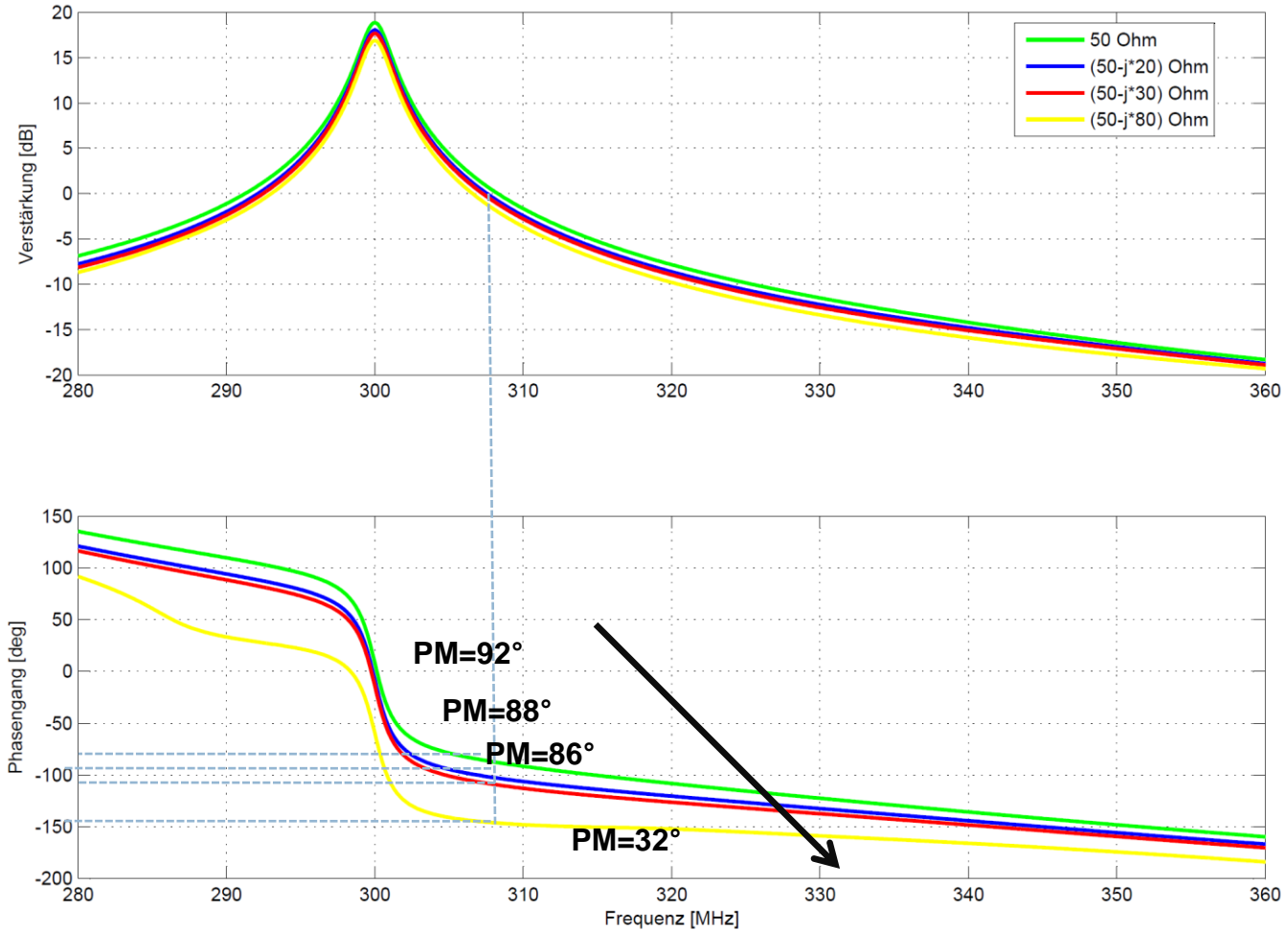
• Simulation

• Stabilitätsbetrachtung

• Realisierung und Messergebnisse

• Zusammenfassung

➤ Lastimpedanzen mit kapazitivem Anteil



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

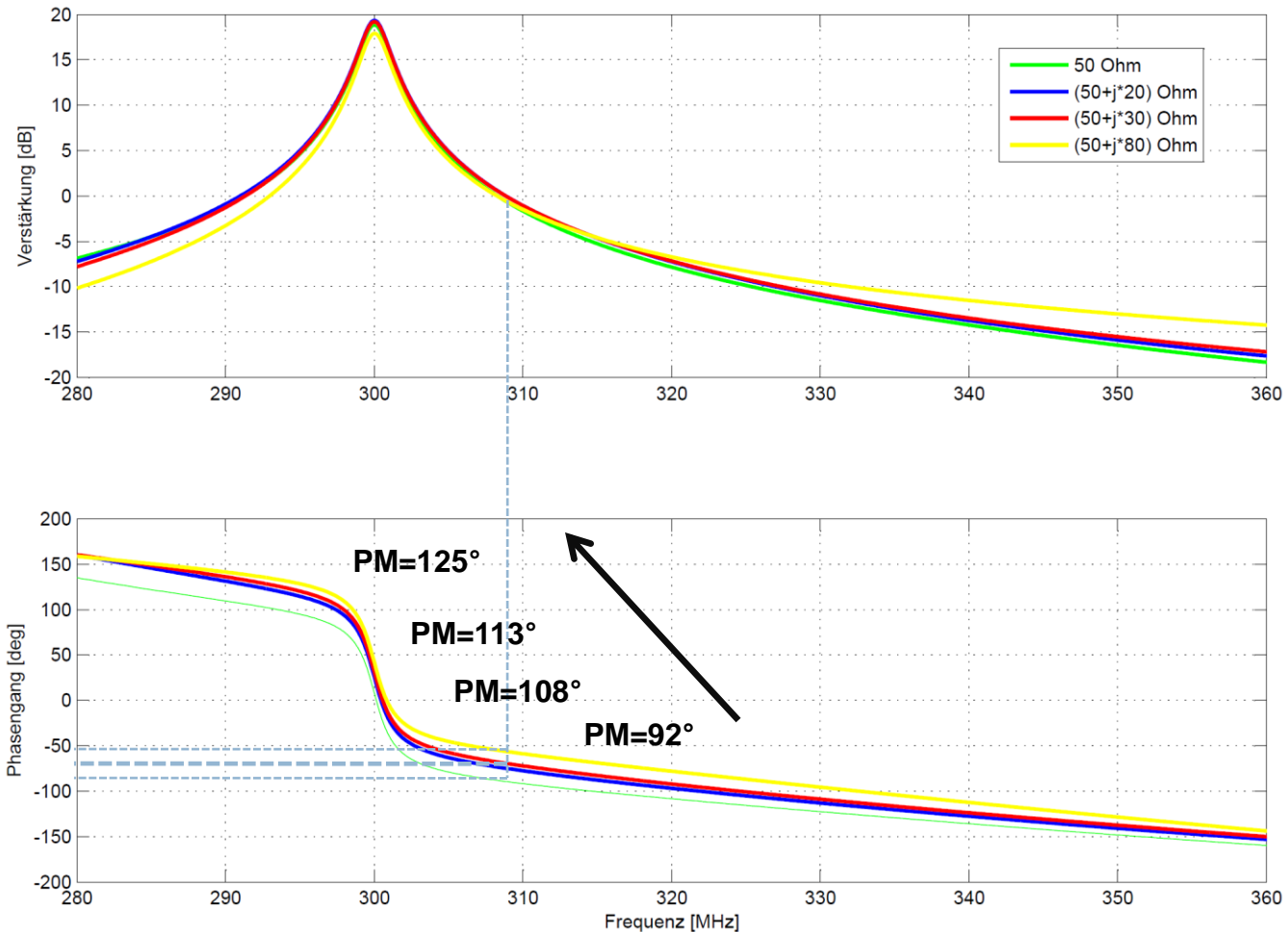
•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Lastimpedanzen mit induktivem Anteil



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

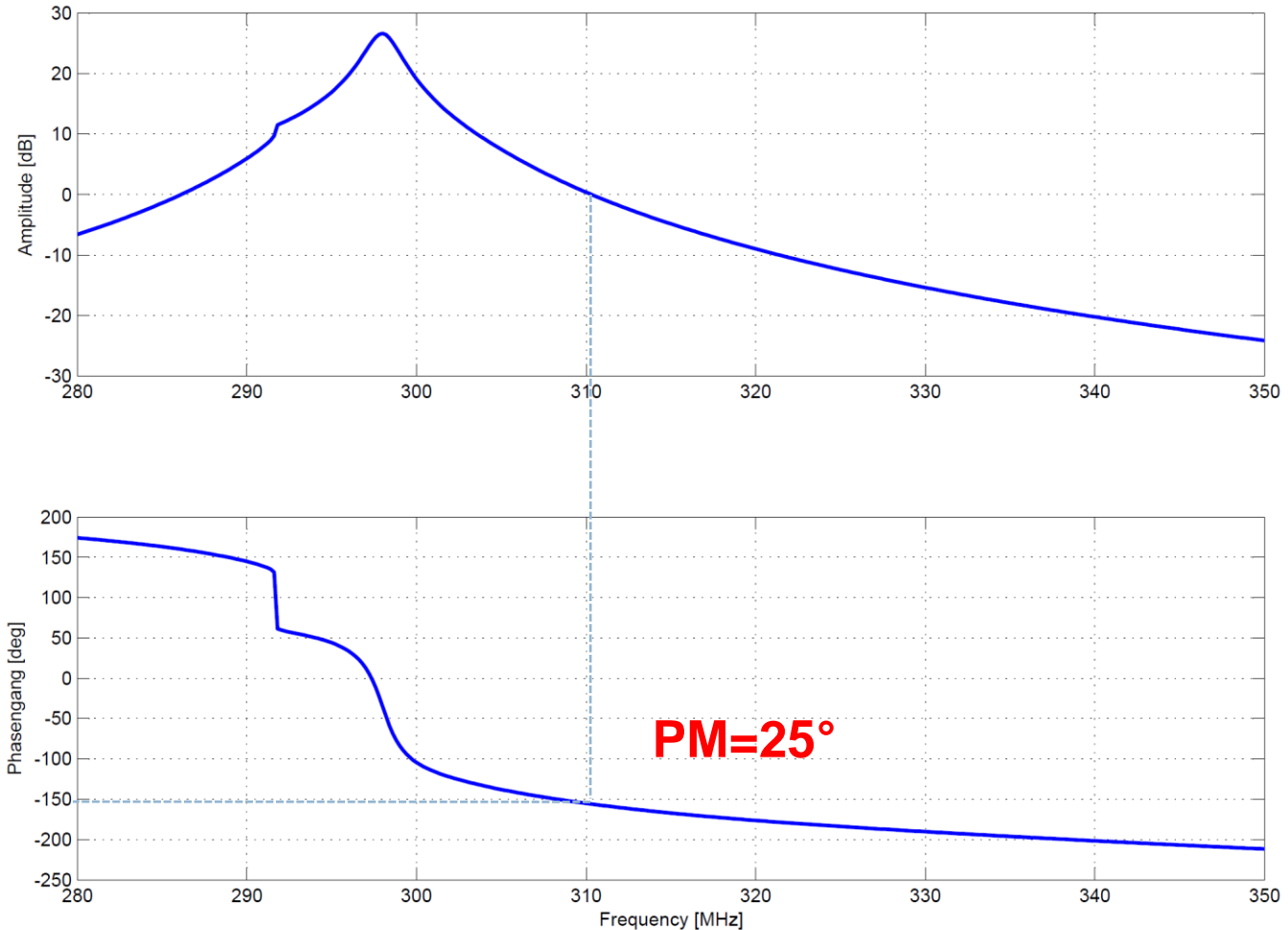
•Simulation

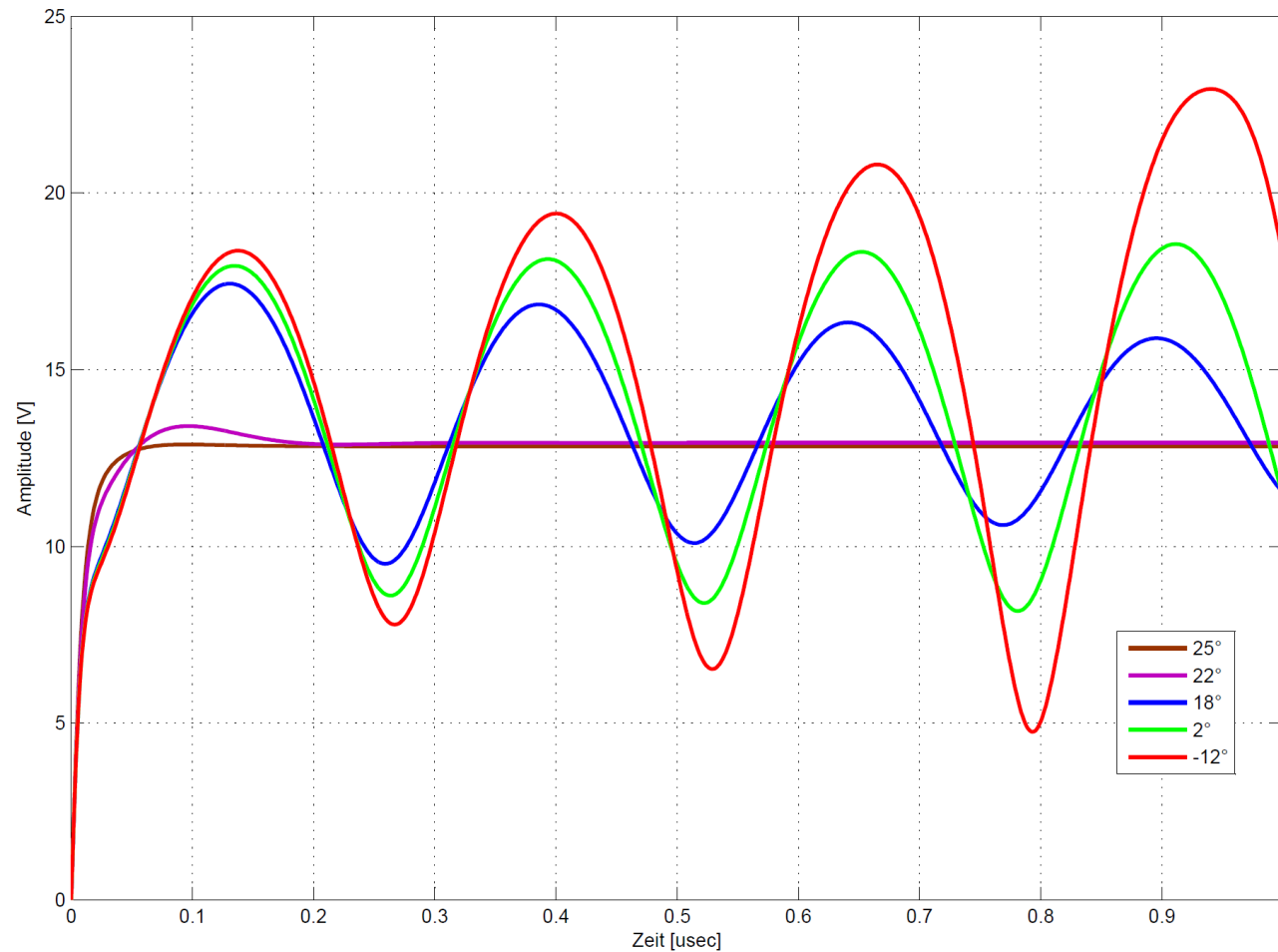
•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Einfluss der Phase des LO-Signals: Leerlauf



➤ **Einschwingverhalten bei verschiedenen LO-Phasen**

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

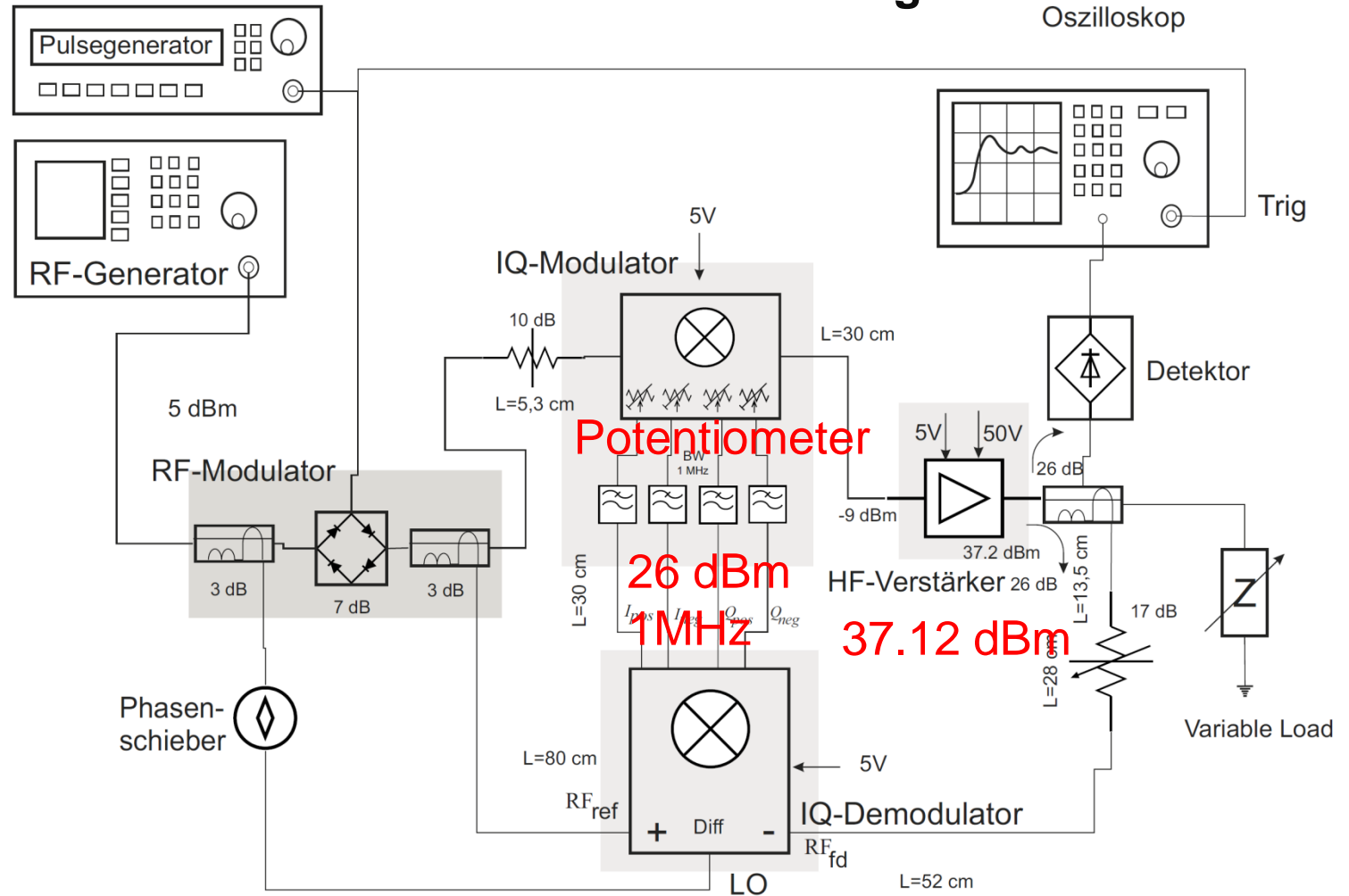
•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

- Motivation
- Cartesian Feedback
- Entwurf der Teilschaltungen
- Simulation
- Stabilitätsbetrachtung
- Realisierung und Messergebnisse
- Zusammenfassung

Die Messanordnung



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

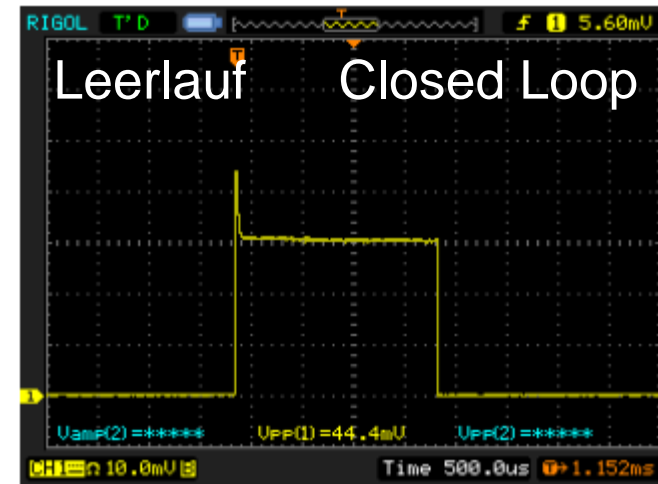
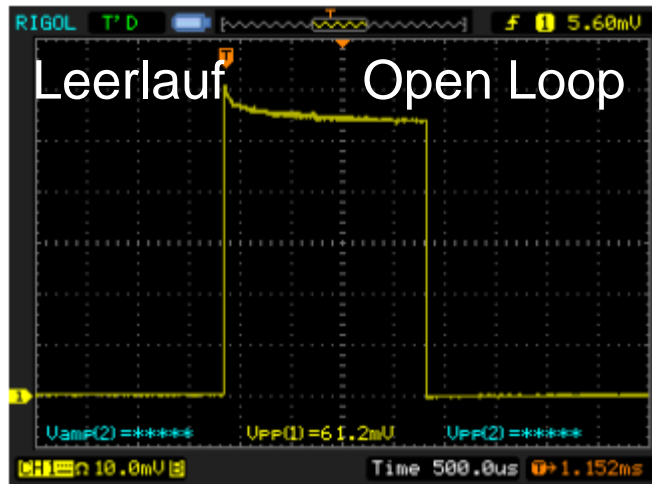
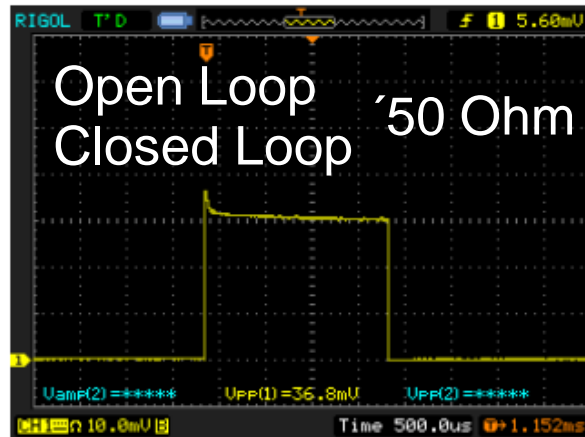
•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

➤ Korrekturverhalten bei Leerlauf:



•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

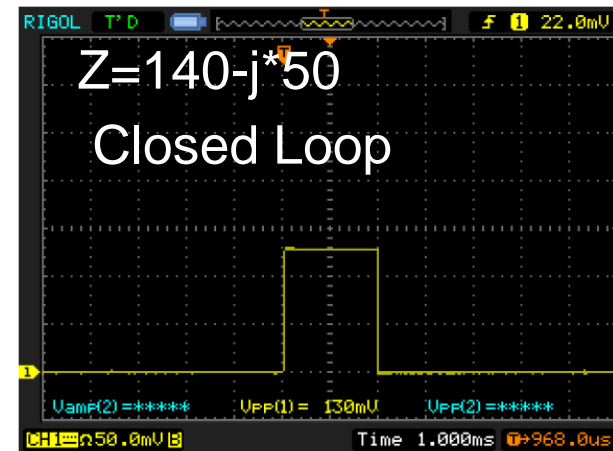
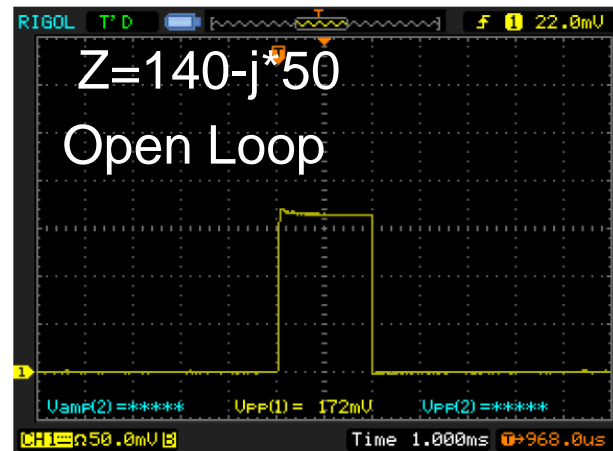
•Zusammenfassung

➤ **Korrekturverhalten bei verschiedenen Abschlussimpedanzen:**

▪ **3dB Dämpfungsglied: $140-j*50$ Ohm**

▪ **6dB Dämpfungsglied: $77-j*25$ Ohm**

▪ **3dB+ $\frac{\lambda}{8}$ Leitung : $15-j*6$ Ohm**



• Motivation

• Cartesian Feedback

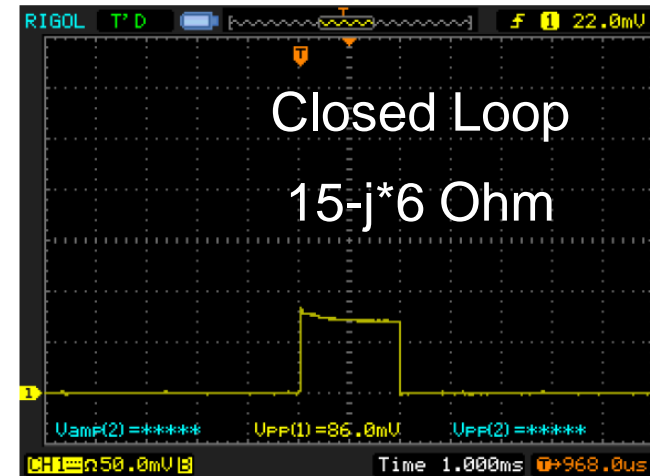
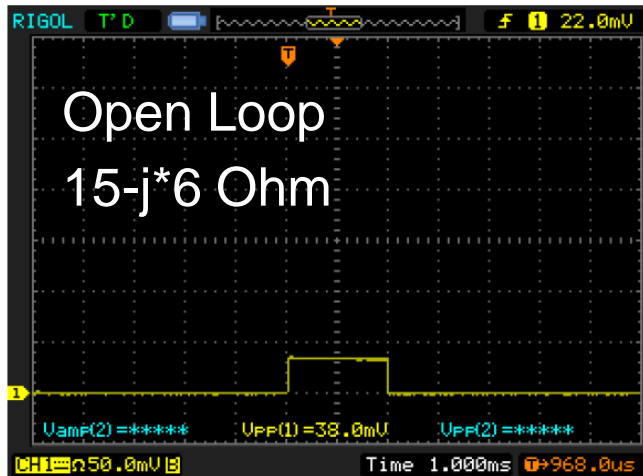
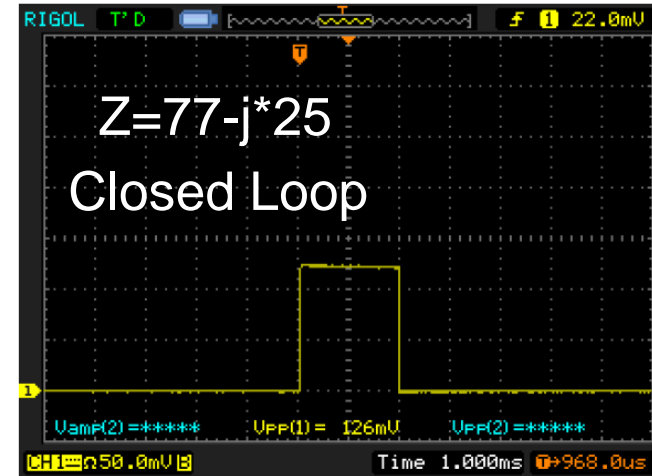
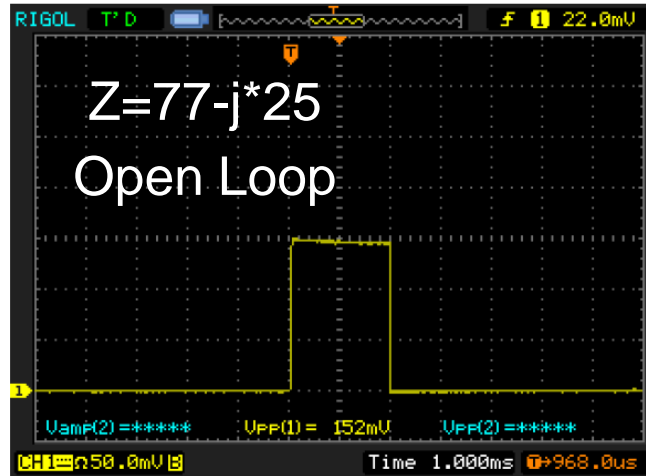
• Entwurf der Teilschaltungen

• Simulation

• Stabilitätsbetrachtung

• Realisierung und Messergebnisse

• Zusammenfassung



➤ Einfluss der LO-Phase auf die Stabilität: Leerlaufbetrieb

• Motivation

• Cartesian Feedback

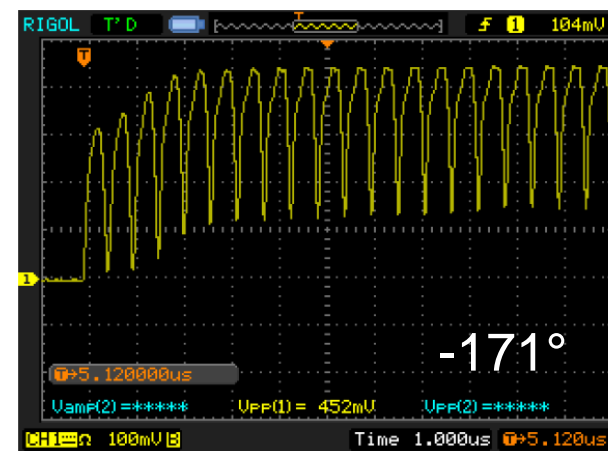
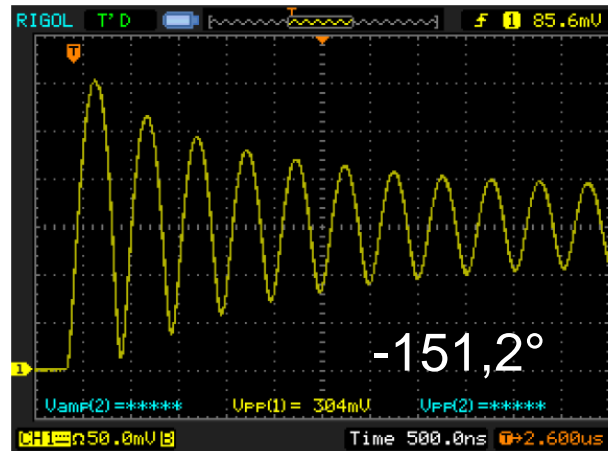
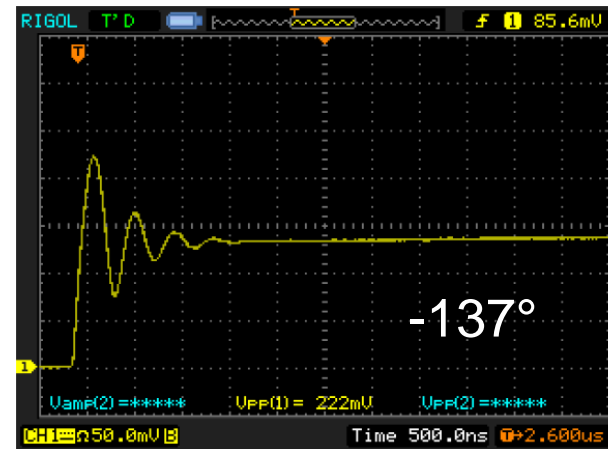
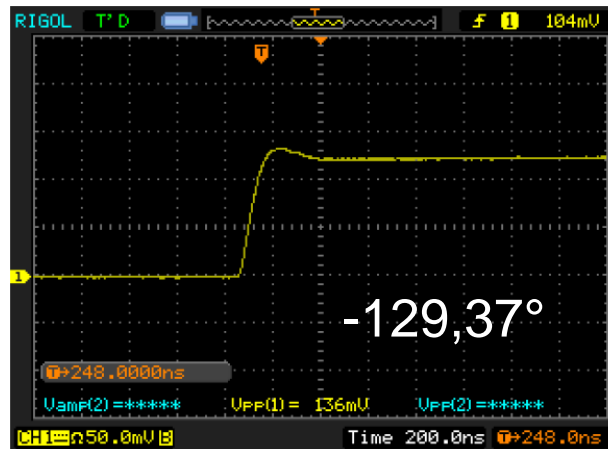
• Entwurf der Teilschaltungen

• Simulation

• Stabilitätsbetrachtung

• Realisierung und Messergebnisse

• Zusammenfassung



Instabilität!!

•Motivation

•Cartesian Feedback

•Entwurf der
Teilschaltungen

•Simulation

•Stabilitätsbetrachtung

•Realisierung und
Messergebnisse

•Zusammenfassung

- ❖ **Geringe Filterbandbreite verbessert das Stabilitätsverhalten der Regelschleife.**
- ❖ **Kapazitive Lastimpedanzen verursachen negative Phasendrehung und reduzieren damit die Phasenreserve.**
- ❖ **Je kleiner die Phasenreserve ist, desto stärker neigt das System zu schwingen.**
- ❖ **Die Regelung kann bei sehr niedrigen kapazitiven Lastimpedanzen nicht wie gewünscht korrigieren.**
- ❖ **Die Regelung funktioniert nur wenn der Leistungsverstärker nicht im Sättigungsbereich betrieben wird: Verzicht auf Leistung für mehr Regelung.**
- ❖ **Der DC-Arbeitspunkt des IQ-Modulators muss für mehr Dynamik im unteren linearen Bereich eingestellt werden.**
- ❖ **Die Phasendrehung des Lokaloszillatorsignals beeinflusst stark das Einschwingverhalten und führt im Extremfall zur Instabilität.**

**DANKE FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT**

FRAGEN?

