



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



Software-Defined Radios als Messempfänger für die EMV



EUROPÄISCHE UNION

DI Christian Spindelberger
christian.spindelberger@tuwien.ac.at

- **Einführung**
- **Funktionsprinzip**
 - Aufbau
 - Signalanalyse
 - Detektion
- **State-of-the-Art Empfänger**
- **Software-Defined Radios**
 - Techniken
 - Vor- und Nachteile
 - Performance
- **Zusammenfassung**

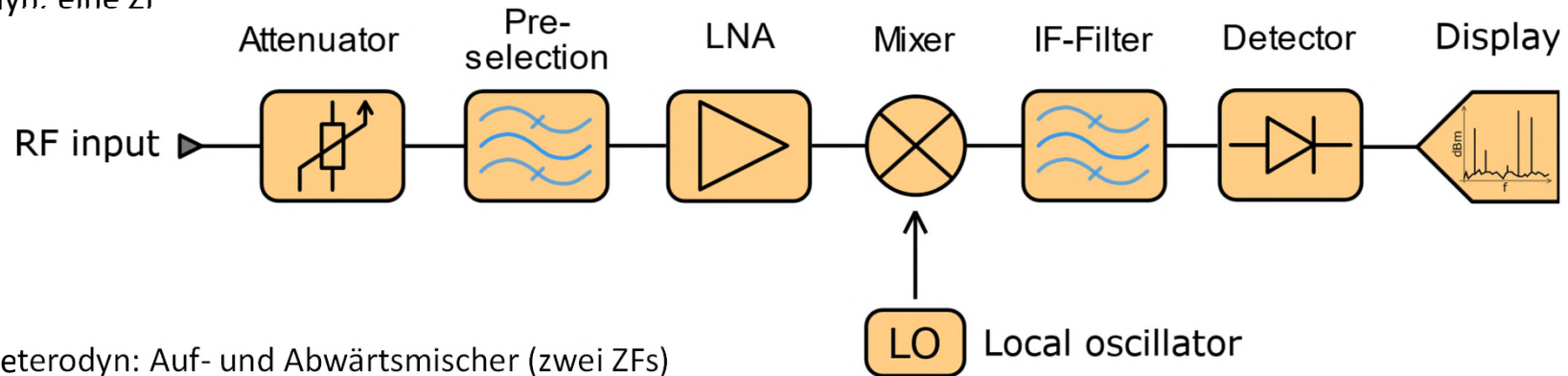
- **Was ist zu messen?**
 - Schnelle Schaltvorgänge: z.B. DC/DC Wandler, Bürstenfeuer, Datenbusse etc.
 - Transiente Signale: Hohe Amplitude, niedrige Spektraldichte
- **Ist mein Empfänger dafür geeignet?**
 - Klassisches Messgerät im Pre-Compliance Bereich: Spektrumanalysator
 - *CISPR 16-1-1* Norm für EMV Messempfänger
 - Black-Box Szenario (Worst-Case Model)
 - Extrem hohe Anforderungen durch unterschiedliche Detektoren
- **Welcher Frequenzbereich ist relevant?**
 - Normabhängig: z.B. EN 55032 Start: 9kHz, Stop: 6GHz
 - Fokus auf *CISPR* Band C/D (höchste Anforderungen)
- **Welche Empfindlichkeit benötige ich?**
 - Professionelles Equipment NF > 10dB
- **Was ist mit low-cost Geräten möglich?**
 - Wie viel Budget ist notwendig?
 - Wann muss ich professionelles Equipment in Betracht ziehen?

- Einführung
- **Funktionsprinzip**
 - Aufbau
 - Signalanalyse
 - Detektion
- State-of-the-Art Empfänger
- **Software-Defined Radios**
 - Techniken
 - Vor- und Nachteile
 - Performance
- Zusammenfassung

Funktionsprinzip

• Empfänger-Strukturen

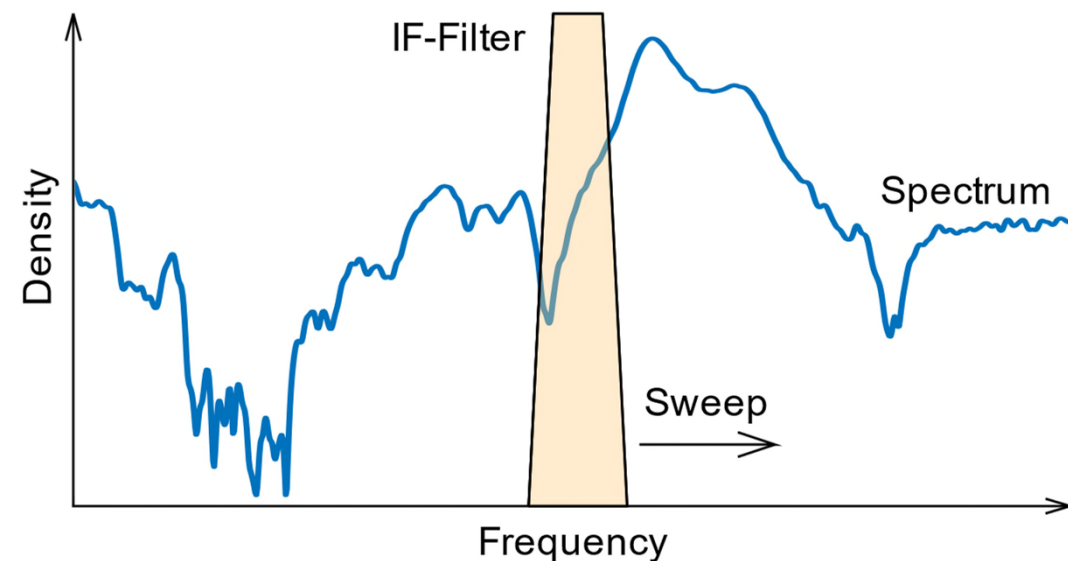
- Heterodyn: eine ZF



- Super Heterodyn: Auf- und Abwärtsmischer (zwei ZFs)
- Homodyn: ZF auf 0Hz

• Signalanalyse

- ZF-Filter wird mittels Mischer auf eine Frequenz abgestimmt
- Detektor evaluiert die Einhüllende im Zeitbereich (Peak, AV, RMS, QP etc.)
- Continuous Sweep: Spektrumanalysator
- Stepped Sweep: EMV Messempfänger
- CISPR toleriert beide Prinzipien
- Messungen von seltenen Events zeitintensiv



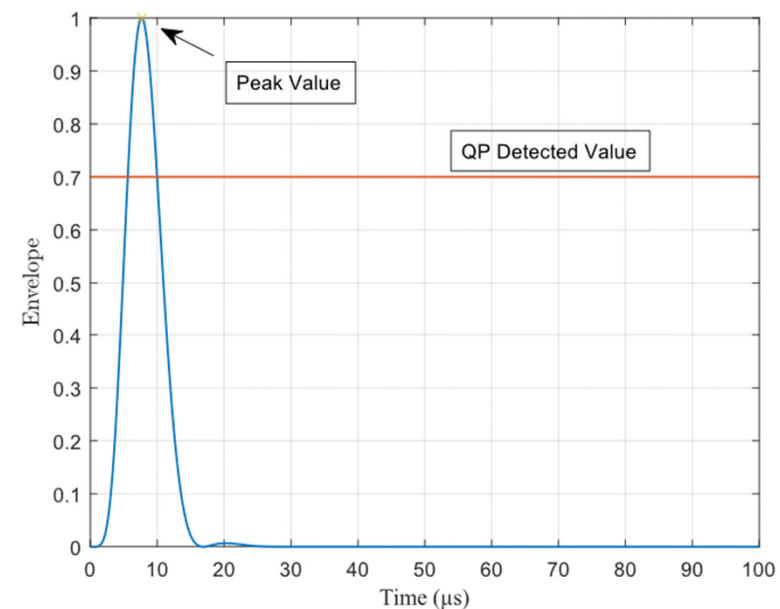
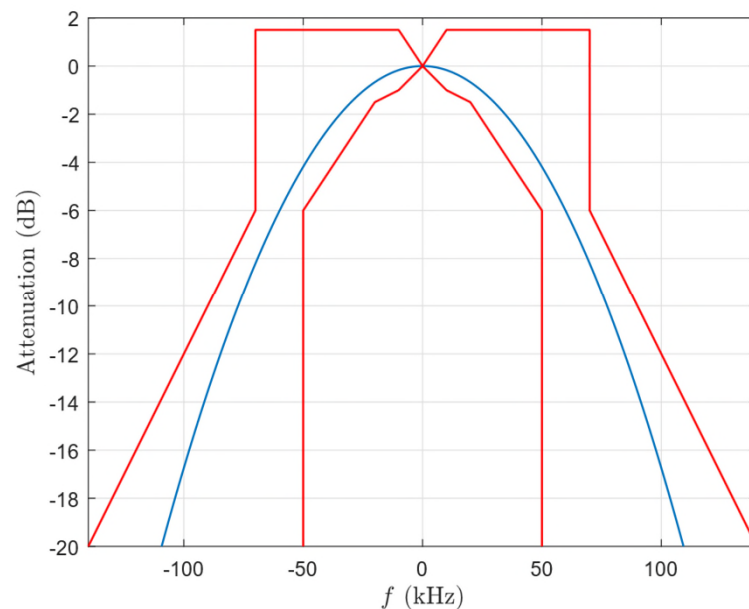
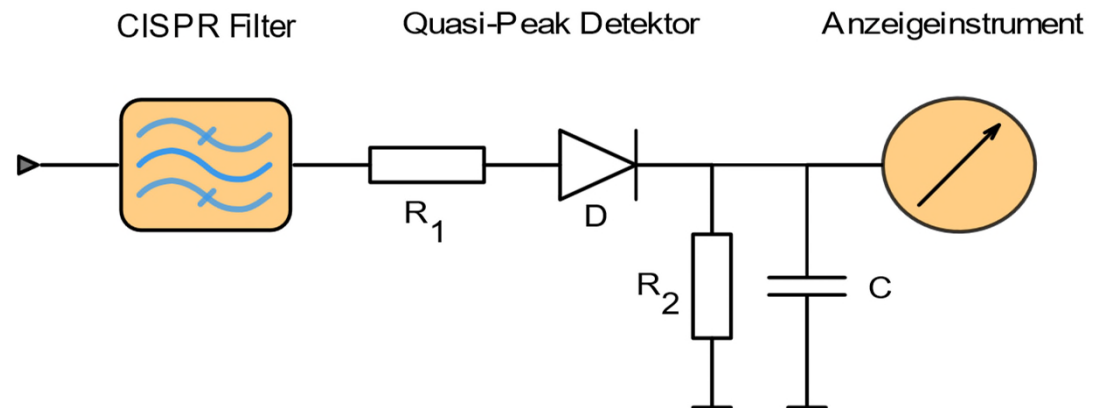
Funktionsprinzip

• QP Detektor

- Gewichtet die Einhüllende
- $T_c = 1\text{ms}$, $T_{dc} = 550\text{ms}$ (C/D)
- Anzeigeeinstrument mechanisch
- 43.5dB Dynamikbereich

• Aufbereitung des Signals

- ZF-Filtermaske vorgegeben
- CISPR Band C/D: $B_6 = 120\text{kHz}$
- Transferkurve üblicherweise mit gaußschem Verlauf modelliert

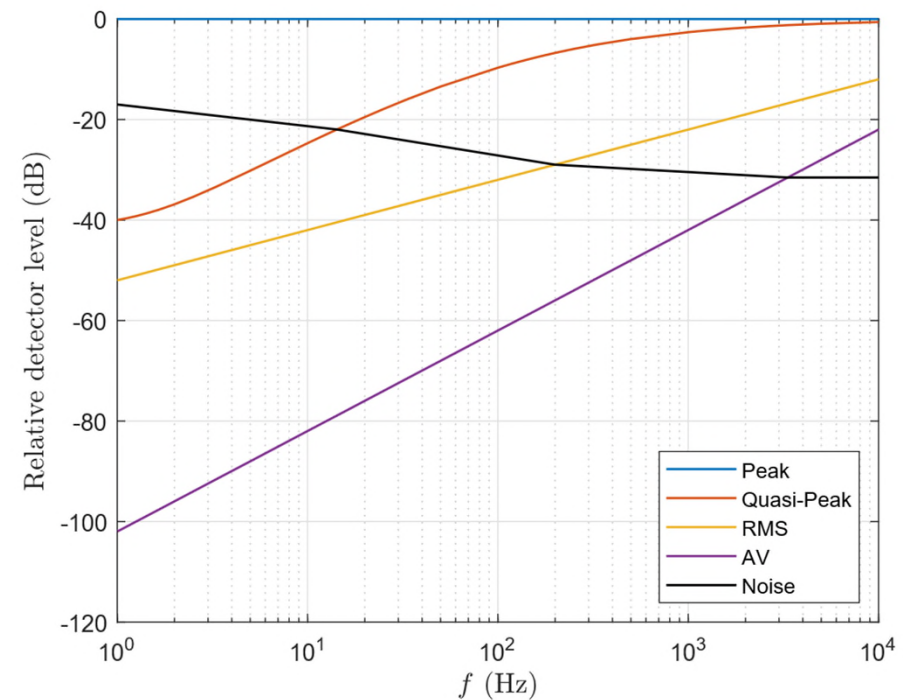


Funktionsprinzip

Limits

- QP Detektor erfordert üblicherweise Filterbänke für die Preselektion
- Laut Norm: SA ohne Preselektion bis zu einer Wiederholrate von ~20Hz nutzbar
- Externer LNA: Nicht mehr compliant!
- Zusätzliche Verstärkung am Eingang reduziert die Dynamik des ersten Mischers!

Filter band	Filter type	6 dB BW (nominal)
20 Hz to 150 kHz	Fixed bandpass	310 kHz
150 kHz to 1 MHz	Fixed bandpass	1.7 MHz
1 to 2 MHz	Fixed bandpass	2.4 MHz
2 to 5 MHz	Fixed bandpass	7.5 MHz
5 to 8 MHz	Fixed bandpass	10 MHz
8 to 11 MHz	Fixed bandpass	9.5 MHz
11 to 14 MHz	Fixed bandpass	9.5 MHz
14 to 17 MHz	Fixed bandpass	10 MHz
17 to 20 MHz	Fixed bandpass	9.5 MHz
20 to 24 MHz	Fixed bandpass	9.5 MHz
24 to 30 MHz	Fixed bandpass	9.0 MHz
30 to 70 MHz	Tracking bandpass	10 MHz
70 to 150 MHz	Tracking bandpass	24 MHz
150 to 300 MHz	Tracking bandpass	28 MHz
300 to 600 MHz	Tracking bandpass	50 MHz
600 MHz to 1 GHz	Tracking bandpass	60 MHz
1 to 2 GHz	Tracking bandpass	180 MHz
2 to 3.6 GHz	Fixed highpass	1.89 GHz (-3 dB corner frequency)



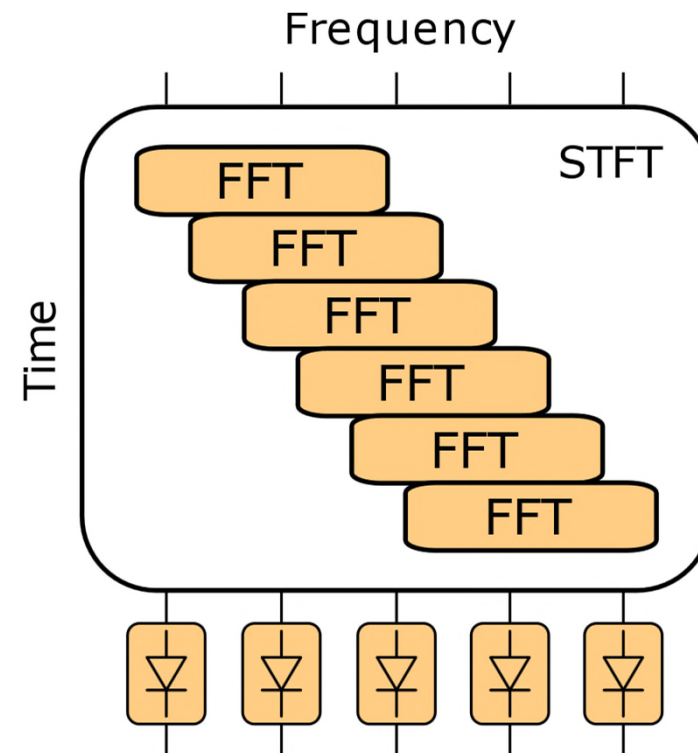
- Einführung
- Funktionsprinzip
 - Aufbau
 - Signalanalyse
 - Detektion
- **State-of-the-Art Empfänger**
- Software-Defined Radios
 - Techniken
 - Vor- und Nachteile
 - Performance
- Zusammenfassung

- **Time Domain Analysis**

- Parallelisierung einer Vielzahl von Detektoren
- FFT von überlappenden Sequenzen
- Window -> ZF Filter
- Überlappung bis zu 90%
- Frequenzauflösung ca. 50kHz (20μs pro FFT)
- Auf jeden diskreten Frequenzbin folgt ein Detektor

- **QP Detektor / Anzeigeinstrument**

- IIR Filter (bi-lineare Z-Transformation)
- Nichtlinearität modelliert mit zwei Filtern und einem Komparator
- Anzeigeinstrument: Filter 2. Ordnung



- **Keysight**

- Klassischer Empfänger: Super Heterodyn
- Sehr feinstufige Preselektion
- Signalanalyse auf 160MHz Bandbreite beschränkt
- Nicht durchgehend anwendbar!

- **Gauss**

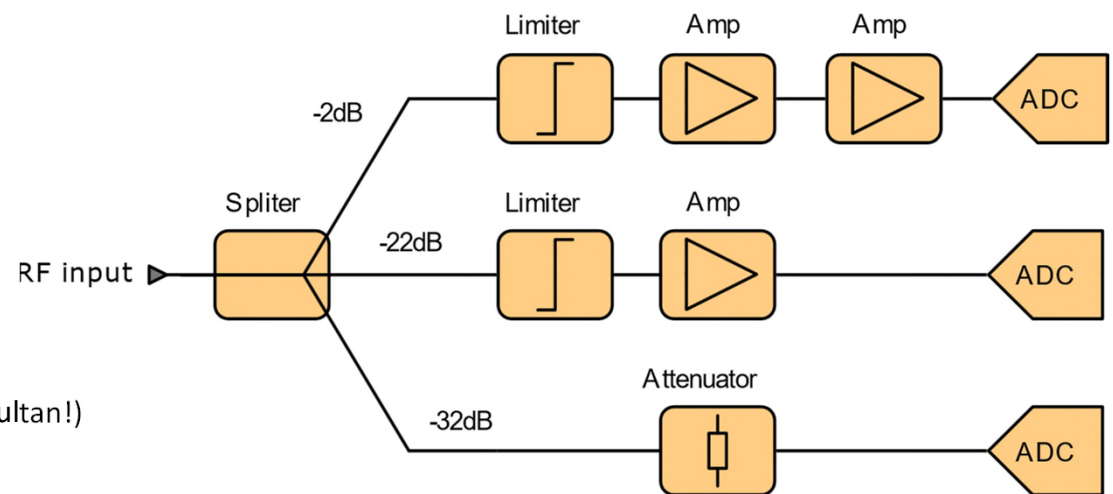
- Breitbandanalysator (685MHz simultan)
- Erweiterung des Dynamikbereichs durch mehrere ADCs (vertikal)

- **R&S**

- Parallelisierung mehrerer ADCs mittels Filterbank (Bis zu 1GHz simultan!)
- Keine Mischer notwendig -> wie bei Gauss

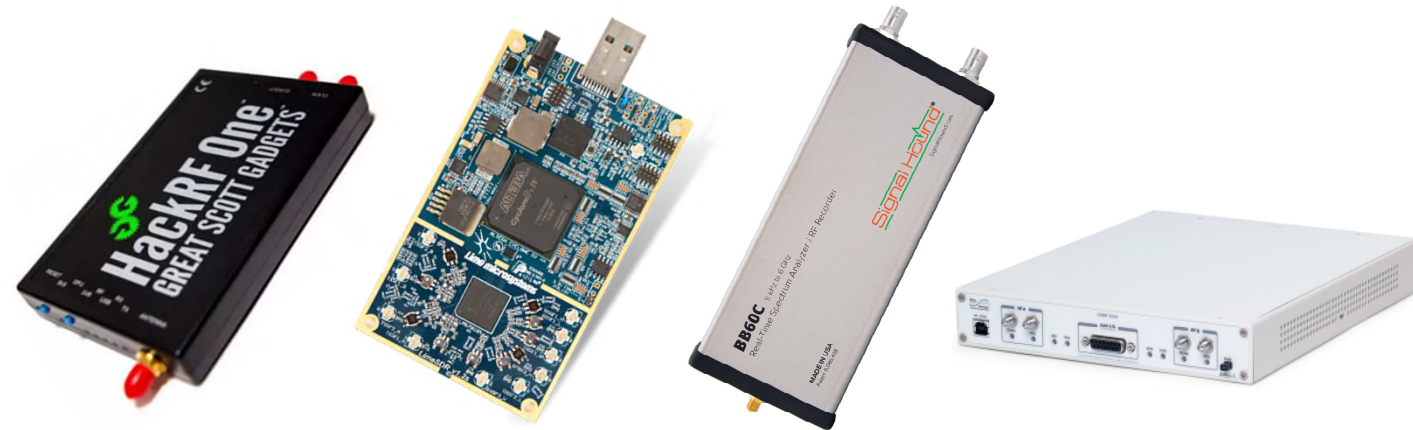
- **Narda STS**

- Fully compliant, low budget
- Mit integrierter LISN und gratis Software



- Einführung
- Funktionsprinzip
 - Aufbau
 - Signalanalyse
 - Detektion
- State-of-the-Art Empfänger
- **Software-Defined Radios**
 - Techniken
 - Vor- und Nachteile
 - Performance
- Zusammenfassung

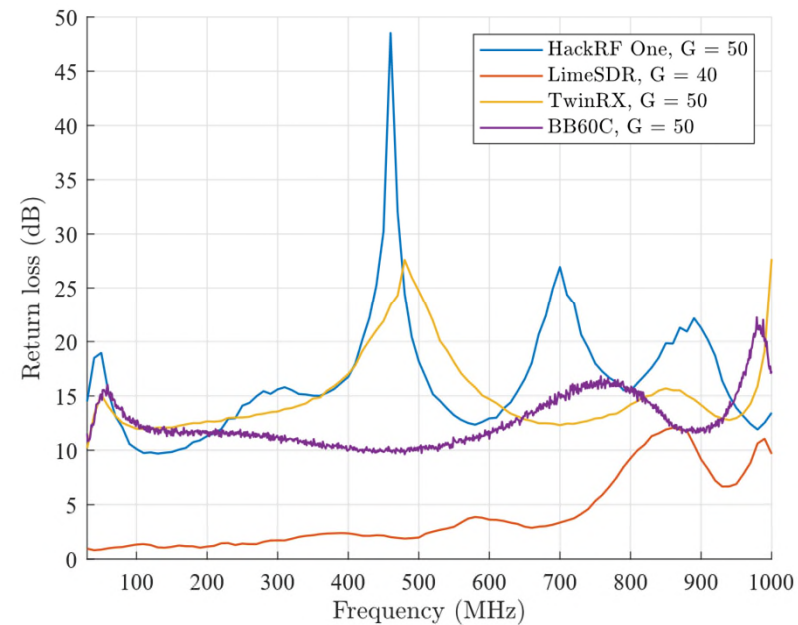
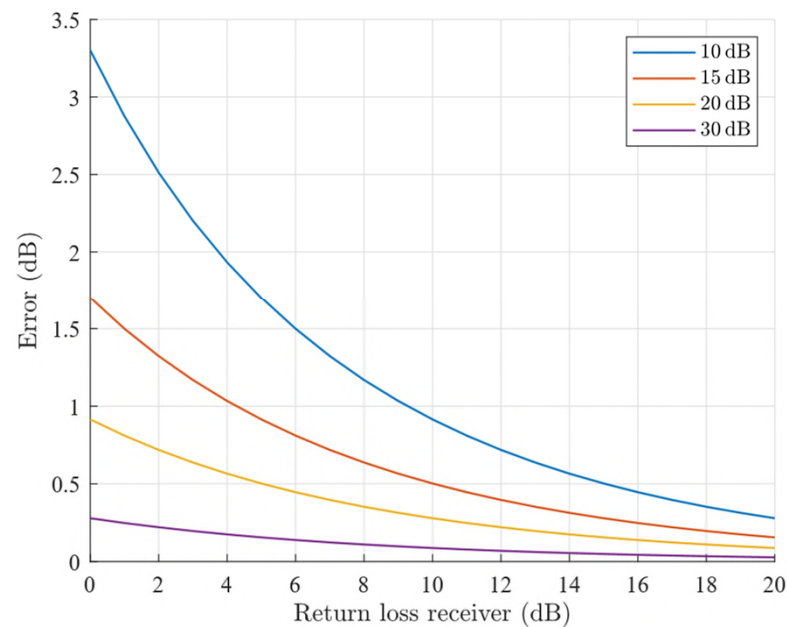
- **Versatiler Empfänger**
- **Einstiegspreis bereits unter 100€**
- **Einstiegsklasse**
 - Integrierte Transceiver Chips
 - Auf hohe Sensitivität getrimmt (LNA)
 - Homodyne Struktur
 - Anfällig für Spurien
- **Hochpreisigere Modelle**
 - Verwendung Super Heterodyner Strukturen
 - Diskreter Aufbau
 - Hohe ADC Auflösung (> 12 Bit)
- **Vorteil: Lange Recordings möglich!**
- **Nachteil**
 - Oft kein Schirmgehäuse
 - Datentransfer: USB 2.0/3.0, Gigabit Ethernet
 - Problem mit Interferenzen
 - Know-how erforderlich



Parameters	<i>Great Scott Gadgets HackRF One</i>	<i>Lime microsystems LimeSDR</i>	<i>Signal Hound BB60C</i>	<i>Ettus Research USRP X310 TwinRX</i>
f_{RF}	1 MHz–6 GHz	100 kHz–3.8 GHz	9 kHz–6 GHz	10 MHz–6 GHz
$f_{s_{max}}$	20 MSa/s	61.44 MSa/s	40 MSa/s	100 MSa/s
ADC res. / ENOB	8 Bit / 7 Bit	12 Bit / 9 Bit	14 Bit / 12 Bit	14 Bit / 11 Bit
Interface	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.0	1G/10G Eth.
Budget	~300€	~300€	~3,000€	~11,000€

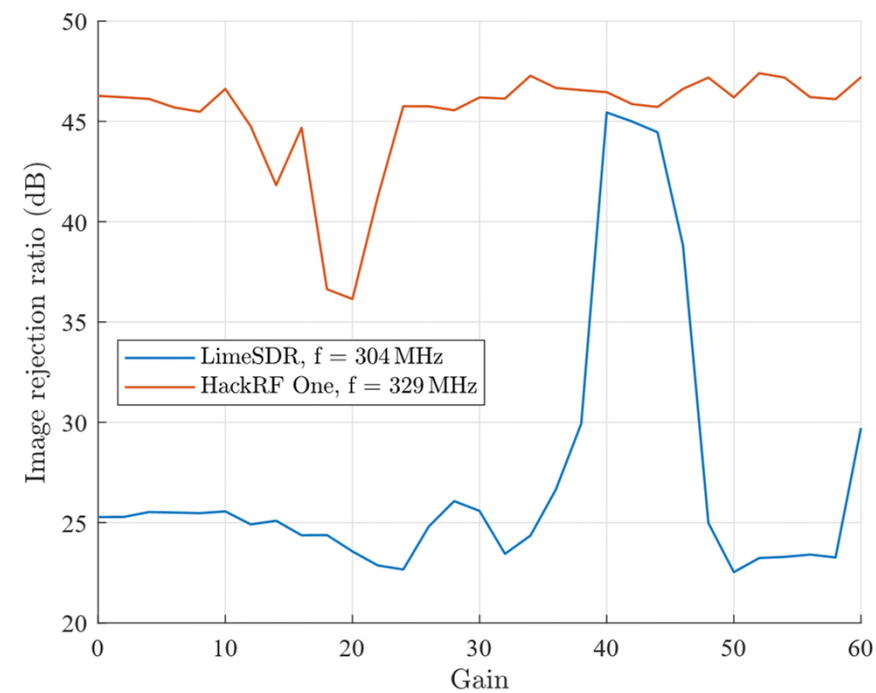
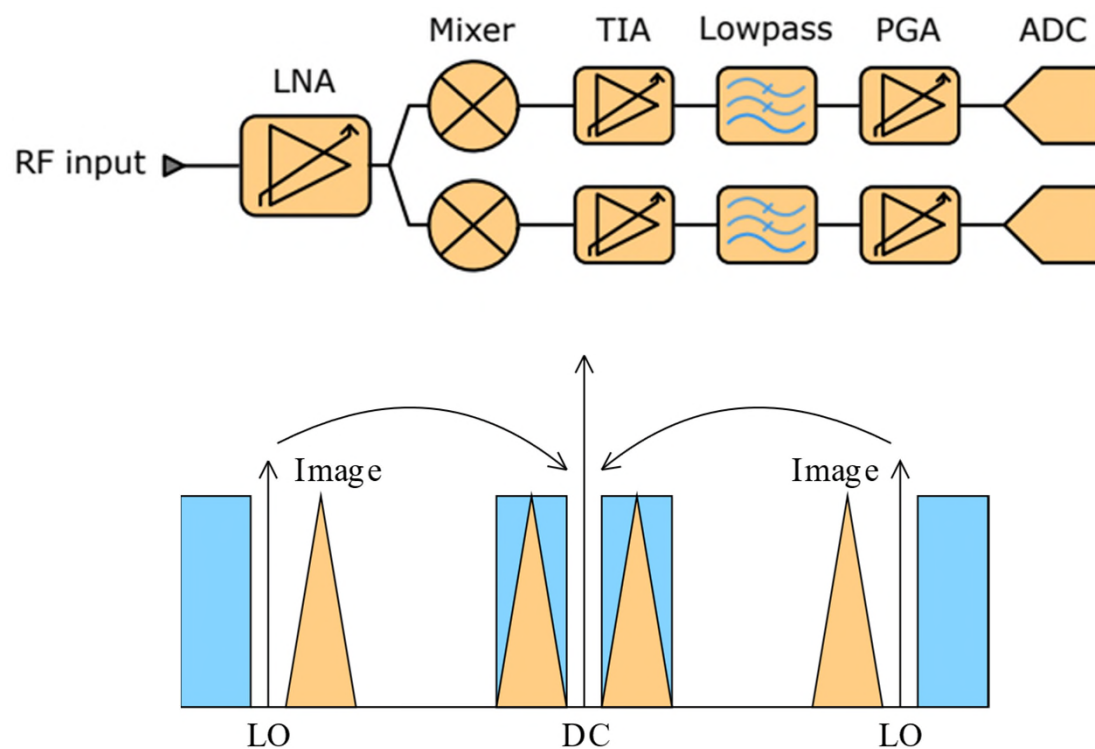
• Anpassung

- $RL = 20 \log_{10} \frac{1}{\Gamma_{\text{SDR}}}$
- CISPR 16-1-1: $RL \geq 10\text{dB}$
- Absoluter Messfehler (z.B. TEM Zelle): $\epsilon = 20 \log_{10} \frac{1}{1 \pm |\Gamma_{\text{SDR}}| |\Gamma_{\text{TEM}}|}$
- Fehler kleiner als $\pm 1\text{dB}$
- LimeSDR: auf den ersten Blick durch Abschwächer lösbar
- Sensitivität für niedrige Frequenzen teilweise nicht ausreichend



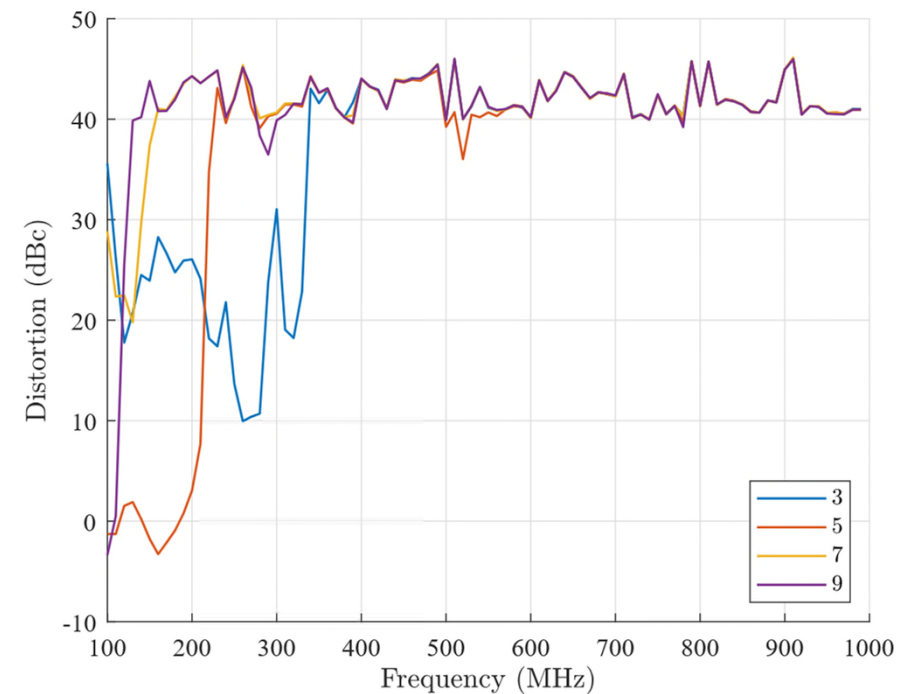
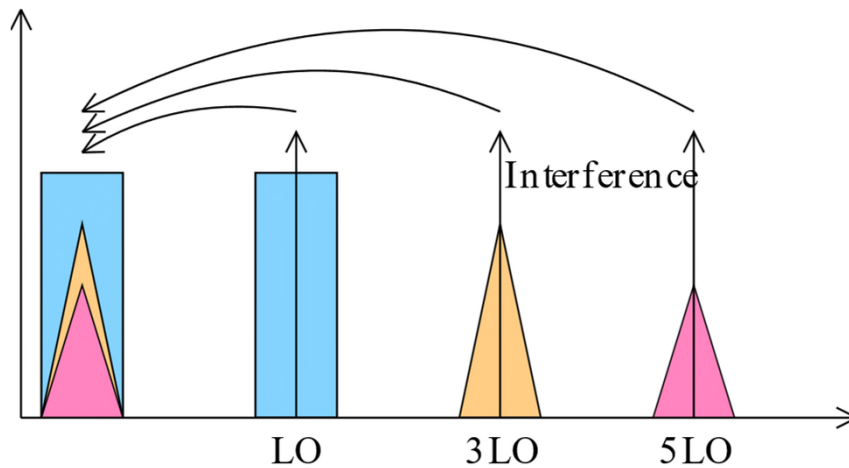
• Spiegelfrequenzunterdrückung

- Zwei idente Mischerpfade erlauben Spiegelbildunterdrückung
- LOs sind um 90° phasenverschoben
- Unterdrückung nicht beliebig hoch (*CISPR* fordert 40dB)
- *LimeSDR* hat zwei Tx Pfade vorgesehen -> bessere Kalibration möglich



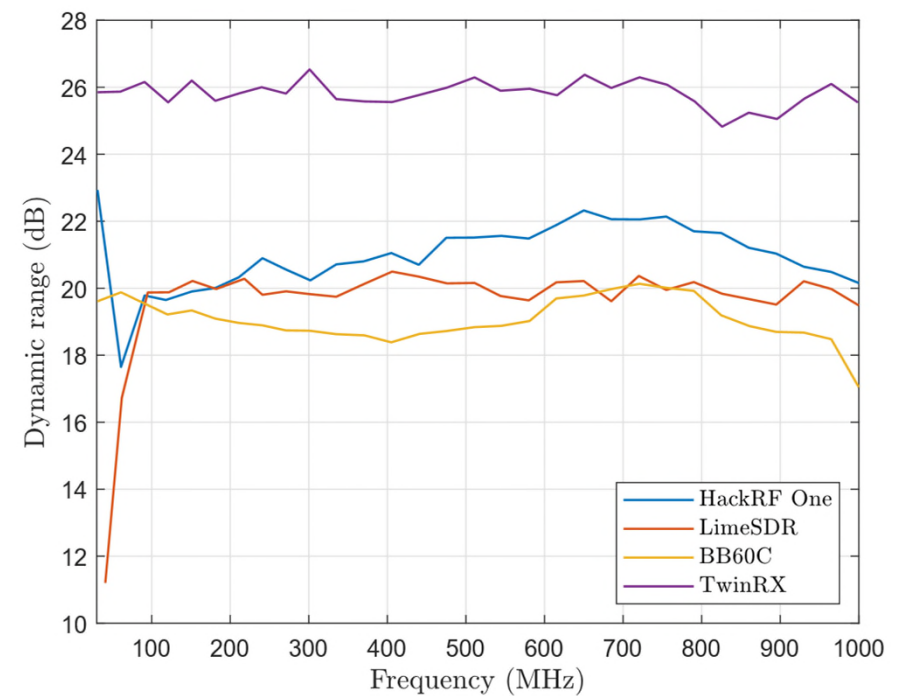
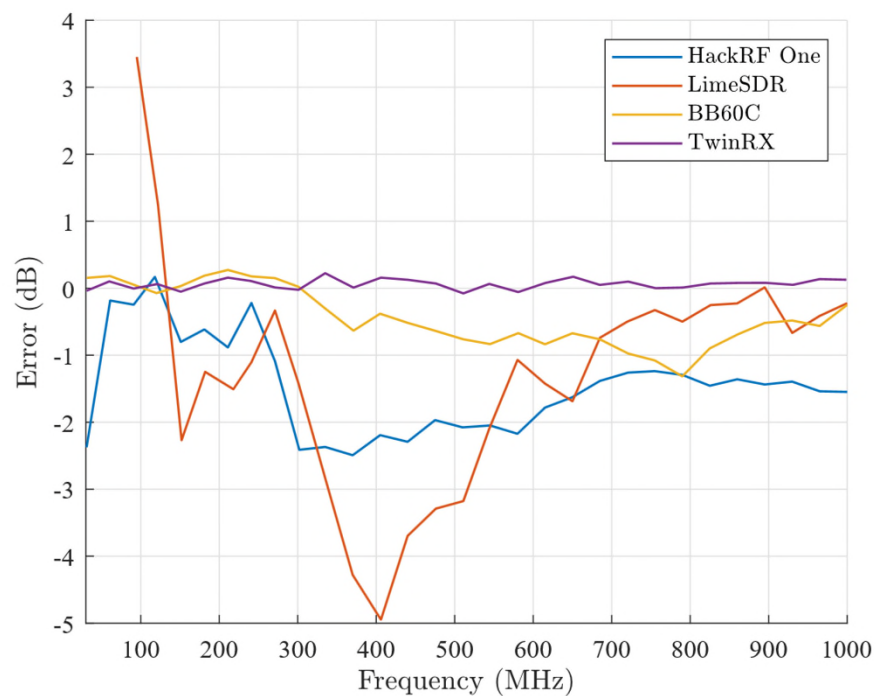
• Harmonische Interferenzen

- LO Signal üblicherweise als Rechteck implementiert
- Harmonische des Trägers verursachen Interferenzen
- Speziell ein Problem für rein homodyne Strukturen
- *HackRF One* hat dieses Problem nicht -> Aufwärtsmischer
- *LimeSDR* unbrauchbar für niedrige Frequenzen!



• Breitband Impuls Genauigkeit

- CW Signal wird auf die Impulsquelle bei $B_0 = 120\text{kHz}$ kalibriert
- Gemittetes SNR $\geq 19\text{dB}$ notwendig für Peak Detektor Messungen
- Band C (30-300MHz) und D (300MHz-1GHz) mittels Filter separiert
- Ausgehend von -87dBm Rauschen (GTEM Zelle mit 500mm Septumshöhe)



- **Einführung**
- **Funktionsprinzip**
 - Aufbau
 - Signalanalyse
 - Detektion
- **State-of-the-Art Empfänger**
- **Software-Defined Radios**
 - Techniken
 - Vor- und Nachteile
 - Performance
- **Zusammenfassung**

- **EMV Messungen mit SDRs sind möglich**
 - Homodyne Empfänger (LimeSDR) unbrauchbar (Harmonische Interferenzen)
- **BB60C bester Kompromiss**
 - Kommt mit gratis Software
 - Shielding
 - Compliant für Peak Messungen
- **TwinRX höchste Dynamik**
 - Verwendbar bis 60Hz (QP Messungen)
- **HackRF One beste low-cost Variante**
- **Limitierte Dynamik des Frontends: hohe ADC Auflösung nicht nutzbar**
- **Höhere Messdynamik: Professionelles Equipment notwendig!**
- **Kompression des Empfängers teils schwer zu detektieren -> Preselektion**