

# Messen mit Oszilloskopen

## Educational Note

### Produkte:

- R&S®RTC1000
- R&S®RTB2000

Die vorliegende Educational Note befasst sich anhand konkreter Messungen mit praxisnahen Messbeispielen gleichermaßen mit Theorie und Praxis digitaler Speicheroszilloskope.

Der theoretische Teil dieses Papiers beschreibt zunächst grundlegende Bedienkonzepte der Oszilloskope. Anschließend wird auf die wichtigsten Einstellungen eingegangen, die es beim Versuchsaufbau und Messen zu beachten gilt. Der letzte Abschnitt des Theorieteils dient zur Vorbereitung auf die nachfolgenden praktischen Versuche.

Der praktische Teil der Educational Note enthält detaillierte Messaufgaben, die in Labors von Hochschulen und Universitäten in kleinen Gruppen durchgeführt werden können. Diese sollen die Ausführungen des theoretischen Teils veranschaulichen und das dort vermittelte Wissen vertiefen. Die Versuche bauen aufeinander auf und behandeln und zeigen den Studenten beispielhaft häufige Messaufgaben im Alltag eines Ingenieurs.

Die aktuelle Version dieses Dokuments findet man auf unserer Homepage:

<http://www.rohde-schwarz.com/appnote/1MA265>

Dieses Dokument wird durch eine Software ergänzt. Die Software kann aktualisiert worden sein, auch wenn die Version des Dokuments sich nicht geändert hat.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Bedienung .....</b>	<b>6</b>
1.1.1 Bedienkonzept und Grundeinstellungen.....	6
1.1.2 Signale und Bandbreite .....	8
1.1.3 Tastköpfe .....	9
<b>1.2 Konfiguration .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 Vertikale Auflösung und Dynamik.....	13
1.2.2 Sampling und Verarbeitung von Signalen .....	14
1.2.3 Grundlegendes Triggern.....	17
<b>2 Vorbereiten praktischer Messungen.....</b>	<b>20</b>
<b>3 Grundlegende Messungen.....</b>	<b>22</b>
3.1 Versuchsaufbau .....	22
3.2 Versuchsdurchführung .....	23
<b>4 Dokumentieren und Speichern.....</b>	<b>30</b>
4.1 Versuchsaufbau .....	30
4.2 Versuchsdurchführung .....	31
<b>5 Fortgeschrittene Trigger-Einstellungen.....</b>	<b>36</b>
5.1 Versuchsaufbau .....	36
5.2 Versuchsdurchführung .....	37
<b>6 Signalanalyse mittels FFT.....</b>	<b>43</b>
6.1 Versuchsaufbau .....	43
6.2 Versuchsdurchführung .....	44
<b>7 Analyse von protokollbasierten Bussignalen .....</b>	<b>48</b>
7.1 Messaufbau .....	48
7.2 Versuchsdurchführung .....	49
<b>8 Übung zu FMCW-Radaren.....</b>	<b>55</b>
8.1 Versuchsaufbau .....	55
8.2 Versuchsdurchführung .....	56
8.3 Gleichungen im MATLAB®-Code.....	57
<b>9 Literatur .....</b>	<b>60</b>

A.1	Anhang 1 Das Versuchsboard.....	61
A.2	Radarversuch: von der Idee zum Entwurf .....	63
A.3	Radarversuch: Aufbauschema der HF-Komponenten.....	63
A.4	Radarversuch: Liste der Komponenten .....	64

In der dieser Educational Note werden folgende Abkürzung für die Rohde & Schwarz Geräte benutzt:

- Das R&S® RTC1000 Oszilloskop wird als RTC1000 bezeichnet.
- Das R&S® RTB2000 Oszilloskop wird als RTB2000 bezeichnet.

# 1 Grundlagen

Oszilloskope gehören zu den vielseitigsten Messinstrumenten, sie kommen für die Analyse und den Test analoger wie auch digitaler Schaltungen zum Einsatz. Durch die Möglichkeit verschiedenste elektronische Signale darzustellen und zu analysieren finden Oszilloskope in unterschiedlichsten Bereichen der Forschung und Entwicklung Verwendung.

Obwohl moderne Oszilloskope die automatische Einstellung aller Parameter unterstützen, ist es essentiell ein grundlegendes Verständnis für die Funktion und Bedienung der Messgeräte zu entwickeln. Gerade durch die hohe Automatisierung des gesamten Messvorgangs verlassen sich viele Anwender gänzlich auf die gelieferten Ergebnisse. Die Logik hinter den Messungen bleibt dem Benutzer hierbei jedoch verborgen. Um die Ergebnisse hinterfragen zu können ist deshalb ein fundiertes Praxiswissen erforderlich. Das Ziel dieser Educational Note ist die Vermittlung der notwendigen Grundlagen für die fachgerechte Durchführung typischer Messaufgaben.

Die Beschreibungen und Versuche beziehen sich auf moderne Oszilloskope. Für die gesamten theoretischen Beschreibungen und praktischen Aufgaben wurde das R&S®RTC1000 aus Abbildung 1 verwendet. Nur für die Übung aus Kapitel 8 "FMCW Radar" wird statt dem RTC1000 das RTB2000 Oszilloskop verwendet.

Das vorliegende Kapitel bezieht seine Inhalte zum Teil aus dem Handbuch für das Oszilloskop R&S®RTO (1) sowie der englischsprachigen Kurzeinführung für Oszilloskope "Oscilloscope Fundamentals" von Rohde & Schwarz (2).



Abbildung 1: Das digitale Speicheroszilloskop R&S®RTC1000

## 1.1 Bedienung

Dieses Kapitel stellt die wichtigsten Einstellungen bei der Messung mit Oszilloskopen vor und führt in die Bedienung der Geräte ein. Außerdem soll der Leser ein Gefühl für die Wahl eines geeigneten Messaufbaus und der benötigten Hardware entwickeln, um reproduzierbare und korrekte Ergebnisse zu erhalten.

### 1.1.1 Bedienkonzept und Grundeinstellungen

Ein Oszilloskop stellt generell eine bestimmte Variable als Funktion einer anderen dar. Der üblichste Anwendungsfall ist die Darstellung von Spannung über der Zeit, wobei sich mit einem entsprechenden Umwandler nahezu alle Phänomene in elektrische Signale umsetzen lassen. Oszilloskope besitzen in der Regel mindestens zwei unabhängige Kanäle, wobei beispielsweise die Spannung von Kanal 2 über die Spannung von Kanal 1 wiedergegeben werden kann. Ein Anwendungsfall hierfür wird in Kapitel 3.2 vorgestellt. Um die Achsen der Darstellung zu skalieren, wird das vertikale beziehungsweise horizontale System verwendet.

Unter das vertikale System fallen alle Einstellungen, welche die Skalierung der Amplitude oder den vertikalen Offset des Signals betreffen. Dementsprechend kann über das horizontale System der Wert des zeitlichen Offsets und der Auflösung in Teilen einer Sekunde beeinflusst werden.

Neben diesen Grundeinstellungen ist das Triggersystem von großer Bedeutung. Mit Hilfe von Triggern kann festgelegt werden, unter welchen Bedingungen das Oszilloskop eine Messung startet. Somit wird eine stabile Signaldarstellung erreicht, welche stets die interessierenden Ausschnitte zeigt.

Auf all diese Einstellungen wird in den folgenden Kapiteln vorbereitend auf die Messaufgaben ab Kapitel 3 noch genauer eingegangen.

Am Beispiel des RTC1000 (siehe Abbildung 1) lässt sich die Gruppierung der beschriebenen Einstellungen erkennen. Neben Einstellungsmöglichkeiten für das Triggersystem (siehe Kapitel 1.2.3) nehmen die Gruppierungen für die vertikale und horizontale Darstellung die gesamten unteren zwei Drittel der Fläche für Bedienelemente ein. Zusätzlich bietet das RTC1000 Knöpfe für systemspezifische Einstellungen, speziellere Messaufgaben und automatisierte Analysen an.

Das Display des RTC1000 ist horizontal und vertikal in 12 beziehungsweise 8 Einheiten aufgeteilt. Dies dient einerseits der schnellen visuellen Abschätzung von Messwerten und andererseits der Skalierung der Achsen. Mit Hilfe von Abbildung 2 soll eine Einführung in die Funktion des horizontalen und vertikalen Systems gegeben werden.

Die Skalierung lässt sich für das vertikale System mit Hilfe des großen Drehknopfes mit der Überschrift *VOLTS/DIV* (① Abbildung 2 rechts) einstellen. Die zugehörige vertikale Skalierung wird im Display links unterhalb des Signals für jeden aktiven Kanal angezeigt. 50 mV bedeuten beispielsweise, dass die Höhe eines Kästchens 50 mV<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Entspricht 50 mv/Div, wobei Div die Abkürzung für Division ist.

entspricht. Demzufolge werden mit dieser Einstellung vertikal über den gesamten Bereich  $50\text{ mV} * 8 = 400\text{ mV}$  dargestellt.

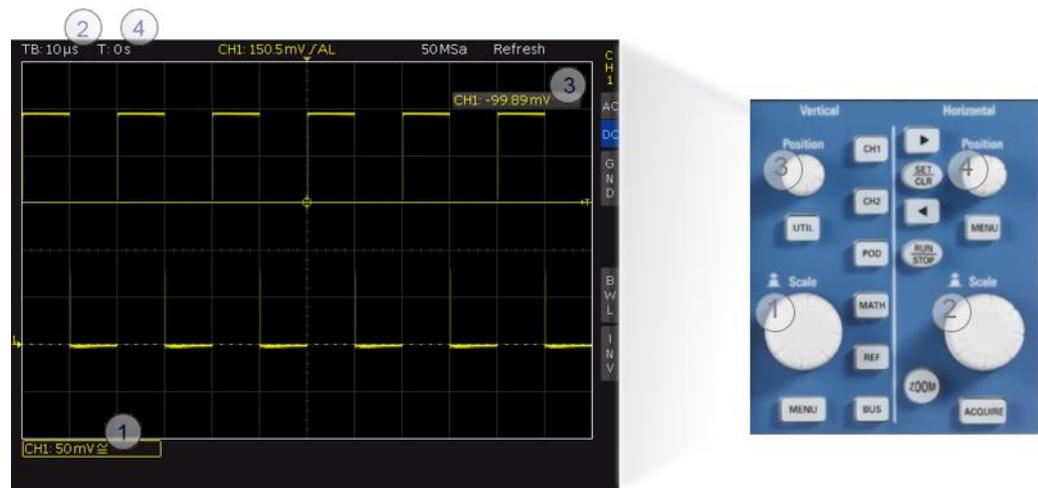


Abbildung 2: Grundeinstellungen des horizontalen und vertikalen Systems

Die Zeitbasis wird ganz ähnlich durch den Drehknopf *TIME/DIV* (② Abbildung 2 rechts) eingestellt. Im Beispiel von Abbildung 2 entsprechen  $10\ \mu\text{s}$  der Länge eines Kästchens. Insgesamt wird das Signal also über eine Zeit von  $10\ \mu\text{s} * 12 = 120\ \mu\text{s}$  dargestellt. Im Gegensatz zur Skalierung der Amplitude gilt diese Einstellung für alle Kanäle. Die Räder mit der Überschrift *POSITION* stellen den jeweiligen Offset für vertikales und horizontales System ein.

In Abbildung 3 ist die Messung zweier unipolarer, rechteckförmiger Signale mit dem RTC1000 gezeigt. Die Zeitbasis beträgt  $10\ \mu\text{s}$ . Folglich ist eine Periode des Signals, welches mit Kanal 1 (gelb, oberhalb) gemessen wurde,  $20\ \mu\text{s}$  lang. Es handelt sich also um ein  $50\text{ kHz}$  Signal. Wie bereits beschrieben gilt die gleiche Zeitbasis für alle Kanäle. Deshalb kann durch visuelle Analyse sofort festgestellt werden, dass das mit Kanal 2 aufgenommene Signal (blau, unterhalb) die halbe Frequenz aufweist. Wohingegen zu beachten ist, dass beide Signale sich bezüglich der maximalen Amplitude aufgrund der unterschiedlichen vertikalen Skalierung nicht unterscheiden. Auf den ersten Blick könnte die Amplitude des mit Kanal 1 aufgenommenen Signals größer erscheinen.

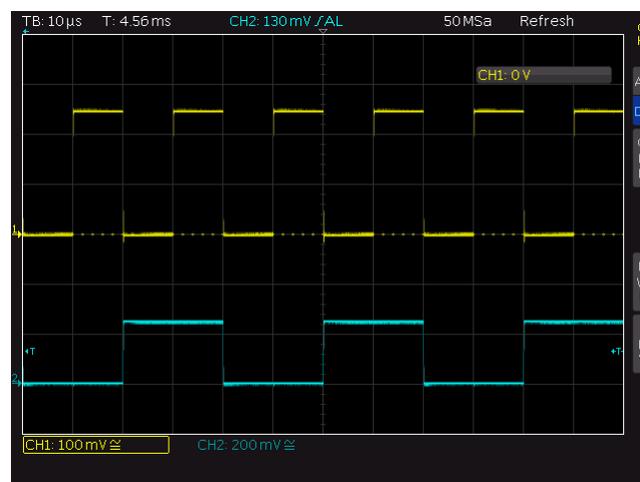


Abbildung 3: Messung mit dem RTC1000

## 1.1.2 Signale und Bandbreite

Für exakte und reproduzierbare Messungen ist die Signalintegrität von großer Bedeutung. Signalintegrität bezeichnet die Eigenschaft eines Oszilloskops, ein elektrisches Signal originalgetreu wiedergeben zu können. Messungen, bei denen dies nicht gegeben ist, sind kaum verwendbar, da das gemessene Signal möglicherweise weder in Form noch in Charakteristik mit dem eigentlichen Signal übereinstimmt.

Aus diesem Grund ist die Bandbreite mitunter eine der wichtigsten Eigenschaften eines Oszilloskops. Nur wenn das Signal nicht durch die endliche Bandbreite des Messgeräts beeinflusst wird, sind exakte Messungen möglich und auch Details des Signals darstellbar. In bestimmten Anwendungen wird die Bandbreite des Messgeräts jedoch mit Absicht reduziert, um beispielsweise den Einfluss von Rauschen zu minimieren.

Per Definition ist die Bandbreite diejenige Frequenz, bei der ein sinusförmiges Signal um 3 dB (circa 30 %) verglichen mit der ursprünglichen Amplitude gedämpft wird. Diese Frequenz entspricht somit dem -3 dB Punkt bei einem Tiefpass, dessen Kennlinie im Grunde auch der Kennlinie jedes Oszilloskops ähnelt. In Abbildung 4 ist der typische Frequenzgang eines 4 GHz Oszilloskops abgebildet. Oszilloskope werden für einen möglichst flachen Frequenzgang innerhalb der spezifizierten Bandbreite dimensioniert, der -3 dB Punkt liegt idealerweise außerhalb der angegebenen Bandbreite. Nahe der oberen Grenze der Bandbreite ist es noch möglich, Signale zu analysieren und vermessen. Allerdings sollten hierbei die jeweiligen Besonderheiten des Frequenzgangs im Hinterkopf behalten werden. Wie in Abbildung 4 erkennbar, sind prinzipiell auch Messungen oberhalb der angegebenen Bandbreite mit Einschränkungen durchführbar. In diesem Fall muss allerdings mit Signalverzerrungen und großen Ungenauigkeiten bezüglich der Messergebnisse gerechnet werden.

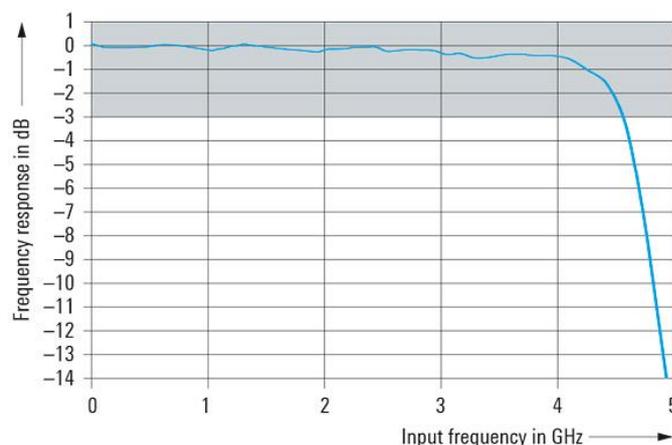


Abbildung 4: Frequenzgang eines 4 GHz Oszilloskops

Oszilloskope werden häufig benutzt, um digitale Pulse zu vermessen. Rechtecksignale verfügen theoretisch über ein unbegrenztes Spektrum bestehend aus der Grundfrequenz (z.B. 1 MHz) und ungeradzahligem Vielfachen der Grundfrequenz, den sogenannten Harmonischen (z.B. 3 MHz, 5 MHz, 7 MHz, ...).

Um eine schnelle Abschätzung der benötigten Bandbreite zu erhalten, haben sich folgende Faustregeln etabliert (2):

- Um bei digitalen Signalen die Integrität zu wahren, sollte die Bandbreite mindestens der fünffachen Taktfrequenz entsprechen. D.h. die Bandbreite lässt Signalanteile bis zu 5. Harmonischen zu.
- Für reine Dekodierung von Signalen ist die dreifache Bandbreite ausreichend.

Ist eine genauere Kenntnis der notwendigen Bandbreite für die Messung digitaler Signale erforderlich, hat es sich als günstig erwiesen, die Anstiegszeit  $T_r$  eines Pulses an Stelle der Taktfrequenz in die Rechnung mit einzubeziehen. Bei einem digitalen Signal ist der Großteil der Energie unterhalb einer bestimmten Frequenz konzentriert. Mit der Formel (1) kann diese Frequenz, in der Literatur auch Kniefrequenz  $f_{knee}$  genannt, berechnet werden. Somit lässt eine elektronische Schaltung mit flachem Frequenzgang bis  $f_{knee}$  ein digitales Signal praktisch unverzerrt durch. Der Faktor 0.35 trägt der heutzutage üblichen Definition für Anstiegszeiten digitaler Signale, bei der die Anstiegszeit von 10 bis 90% des eingeschwungenen Endwertes des Pulses von Bedeutung ist, Rechnung.

$$f_{knee} = \frac{0.35}{T_r} \quad (1)$$

mit

$T_r$  Anstiegszeit eines Pulses

Je nach gewünschter Genauigkeit muss  $f_{knee}$  anschließend noch mit einer Konstanten multipliziert werden. Ist eine Genauigkeit von 20 % ausreichend, so kann  $f_{knee}$  gleich der Bandbreite des Oszilloskops gesetzt werden, während für eine Genauigkeit von 10 %  $f_{knee}$  mit 1,3 multipliziert werden muss. (3)

Bei Messungen sollte neben diesen Überlegungen nicht aus den Augen gelassen werden, dass nicht nur das Oszilloskop selbst Verzerrungen am Signal hervorrufen kann. Auch die verwendeten Tastköpfe können hierfür eine mögliche Ursache sein. Aus diesem Grund sollte die Bandbreite der Tastköpfe mit Hinblick auf das zu messende Signal gewählt werden, um die Signalintegrität zu wahren.

Das folgende Kapitel geht auf diese Effekte genauer ein.

### 1.1.3 Tastköpfe

Tastköpfe stellen im Messaufbau die Verbindung zwischen der Signalquelle, also dem zu vermessenden Objekt, und dem Oszilloskop dar. Dementsprechend ist deren Hauptaufgabe das Signal möglichst originalgetreu für maximale Signalintegrität und Messgenauigkeit an das Oszilloskop zu übertragen. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, ist die Auswahl passender Tastköpfe in Bezug auf die Messaufgabe und verwendete Hardware essentiell. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter und Eigenschaften von Tastköpfen.

Ein idealer Tastkopf würde unter anderem eine unendliche Bandbreite aufweisen, während der zu testende Schaltkreis durch die Messung nicht belastet wird. Somit könnte dessen Verhalten unverfälscht analysiert werden. Diese Eigenschaften sind in realer Hardware nicht abbildbar. Deshalb sollte vor jeder Messung überprüft werden, ob die zu erwartenden Beeinträchtigungen noch akzeptabel sind oder der zulässige Frequenzbereich überschritten wurde. Anhand der Bandbreite und Impedanz der verwendeten Tastköpfe lässt sich hierüber eine gute Aussage treffen.

### Bandbreite

Die Kombination aus Oszilloskop und Tastkopf bildet ein neues System mit einer eigenen Bandbreite. Diese kann wie in (2) gezeigt angenähert werden:

$$\frac{1}{B_{system}} = \sqrt{\left(\frac{1}{B_{tastkopf}}\right)^2 + \left(\frac{1}{B_{oszilloskop}}\right)^2} \quad (2)$$

Damit mögliche Messfehler so klein wie möglich gehalten werden, sollte die Systembandbreite größer als die höchste im Signal vorkommende Frequenz gewählt werden.

Um eine Abschätzung der benötigten Bandbreite der verwendeten Tastköpfe zu erhalten, kann folgende Regel verwendet werden (2):

- Die Bandbreite der Tastköpfe sollte das 1,5-fache der Bandbreite des Oszilloskops betragen. (gültig für Oszilloskope bis etwa 1 GHz Bandbreite mit gaußförmiger Bandbegrenzung)

### Impedanz

Neben der Bandbreite ist die Impedanz von Tastköpfen eine für die Praxis relevante Größe. Die Impedanz ist eng mit der Belastung des zu vermessenden Schaltkreises durch das System Oszilloskop-Tastkopf verbunden. So sollte der Widerstand eines Tastkopfes mindestens dem zehnfachen Widerstand der Schaltung entsprechen. Ist dies nicht der Fall, wird beispielsweise eine gedämpfte Amplitude gemessen. Ein nicht vernachlässigbarer Teil des durch den Schaltkreis fließenden Stroms wird nun auch durch den Tastkopf geleitet.

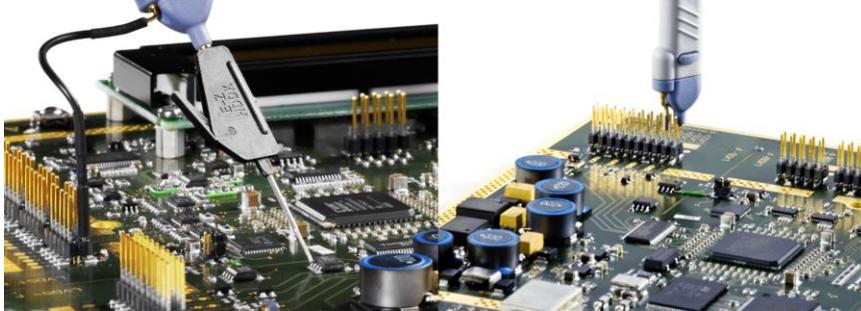
Für diese Einführung in das Messen mit Oszilloskopen sind nur passive Tastköpfe<sup>2</sup> relevant. Deshalb soll ausschließlich dieser Typ hier beschrieben werden. Vor allem für passive Tastköpfe gilt, dass sich die Impedanz über die Frequenz stark verändern kann. Dieser Effekt ist im Wesentlichen den verschiedenen Ursachen zuzuschreiben, die zur Belastung des Schaltkreises beitragen. Bei geringen Frequenzen dominieren die resistiven Anteile. Mit steigender Frequenz wirken zunehmend kapazitive und induktive Anteile:

Die Kapazität des Tastkopfes, welche bei hohen Frequenzen als Tiefpassfilter wirkt, kann die Eingangsimpedanz wesentlich reduzieren. Hierdurch gehen Informationen, die in hochfrequenten Signalanteilen vorhanden sind, verloren während die Anstiegszeit und Bandbreite des Systems verringert wird.

Die Schleife von der Spitze des Tastkopfs über dessen Masseleitung bewirkt eine induktive Belastung des Schaltkreises, welche Verzerrungen, insbesondere Über- und Unterschwingen, in dem Signal hervorruft. Um diesen Effekt zu vermeiden, sollte die Masseanbindung des Tastkopfes wie auch die physikalische Entfernung auf dem Messobjekt möglichst kurz gehalten werden. Abbildung 5 auf der nächsten Seite zeigt hierzu zwei Messbeispiele.

<sup>2</sup> Tastköpfe ohne jegliche aktiven Bauteile, wie beispielsweise Verstärker.

Die Auswirkungen dieser Effekte können so weit gehen, dass beispielsweise ein an sich funktionierender Schwingkreis durch die Belastung bei der Messung mit dem Oszilloskop zusammenbricht.



**Abbildung 5: Messungen mit einem Tastkopf. Links: große (Masse-) Schleife verzerrt die Messung, rechts: optimierte Messung mit kurzer Masseverbindung**

Durch sogenannte 10:1 Tastköpfe kann die Dynamik des Systems sowie die resistive Eingangsimpedanz noch weiter erhöht werden. Bei diesem Typ wird das Eingangssignal um den Faktor 10 gedämpft. Dies hat den Vorteil, dass das Oszilloskop nun auch Signale mit der zehnfachen Amplitude, verglichen mit der Messung mit einem 1:1 Tastkopf, darstellen kann. Jedoch verliert das Gesamtsystem im Gegenzug an Empfindlichkeit, weshalb 1:1 Tastköpfe bei Signalen mit Amplituden im Bereich von einigen Millivolt 10:1 Tastköpfen vorzuziehen sind. Einige Tastköpfe, wie auch die hier bei Messungen verwendeten und in Abbildung 6 dargestellten R&S®RT-ZP03, bieten umschaltbare Teilungsverhältnisse an. Wichtig ist hierbei, dass dem Oszilloskop das Teilungsverhältnis des verwendeten Tastkopfes bekannt ist, um eine korrekte Darstellung der Amplituden zu gewährleisten.



**Abbildung 6: R&S®RT-ZP03 Tastkopf mit 10:1 und 1:1 Teilungsverhältnis**

Passive Tastköpfe zeichnen sich üblicherweise durch eine geringe resistive Belastung aus. Jedoch sollten für Messungen im hohen Megahertz Bereich aufgrund der steigenden kapazitiven Belastung aktive Tastköpfe verwendet werden.

Passive Tastköpfe eignen sich für den universellen Einsatz bei verschiedensten Messungen durch:

- Ihren günstigen Preises
- Den Betrieb ohne zusätzliche Stromversorgung
- Ihre Robustheit

Eine weitere Besonderheit passiver Tastköpfe ist die Notwendigkeit einer Kompensation vor Durchführung von Messungen. Dabei wird zwischen der Kompensation für niedrige und hohe Frequenzen unterschieden. Erstere passt die Kapazität des Tastkopfes an die Eingangskapazität des Oszilloskops an. Wurde beispielsweise ein 10:1 Verhältnis für den Tastkopf gewählt, so verfügt dieser über einen Widerstand von  $9\text{ M}\Omega$ , der mit dem  $1\text{ M}\Omega$  Eingangswiderstand des Oszilloskops einen Spannungsteiler bildet. Durch die Eingangskapazität des Oszilloskops entsteht ein Tiefpass, dessen Frequenzgang durch einen Hochpass mit der gleichen Grenzfrequenz kompensiert werden kann. Aus diesem Grund muss der Hochpass mittels eines regelbaren Kondensators anpassbar sein. Diese Anpassung geschieht durch die manuelle Kompensation der Tastköpfe. Bei Messungen ab circa  $50\text{ MHz}$  wird zusätzlich eine HF-Kompensation empfohlen.

Das RTC1000 bietet hierfür einen eigenen Menüpunkt an, der durch den Kompensationsvorgang führt. In Abbildung 7 ist die Kompensation eines Tastkopfes für niedrige Frequenzen gezeigt. Wie im Vergleich zum rechten Bildabschnitt zu erkennen ist, muss der Tastkopf noch eingestellt werden um die ideale Rechteckform korrekt anzunähern.

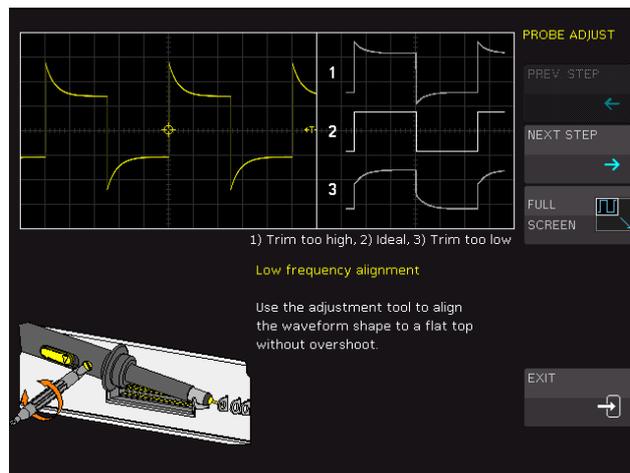


Abbildung 7: Kompensierung eines RT-ZP03 Tastkopfes mit dem RTC1000

## 1.2 Konfiguration

Nachdem der geeignete Messaufbau für die jeweilige Messaufgabe ausgewählt wurde, kann mit der Messung begonnen werden. In Abbildung 8 sind zwei mögliche Messaufbauten beispielhaft dargestellt. Hierbei gilt es, das Oszilloskop, neben den bereits erwähnten Punkten, optimal auf die Anforderungen angepasst zu konfigurieren. Das notwendige Wissen für diese Schritte soll innerhalb dieses Kapitels vermittelt werden.

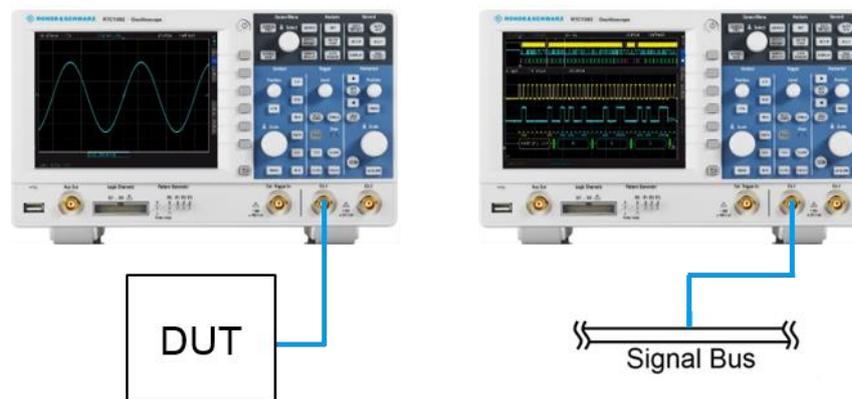


Abbildung 8 Beispielhafte Setups bei Oszilloskopmessungen

### 1.2.1 Vertikale Auflösung und Dynamik

Bei der Verarbeitung des Eingangssignals stellt der Analog-Digital-Konverter (ADC) das Herzstück eines jeden digitalen Oszilloskops dar. Im Fall des RTC1000 handelt es sich um einen 8-Bit Wandler. Der ADC setzt das gemessene Signal in  $2^8 = 256$  Werte um. Die kleinste darstellbare Spannungsdifferenz, welche dem niederwertigsten Bit (LSB) des ADCs entspricht, kann folgendermaßen berechnet werden:

$$U_{lsb} = \frac{\Delta U_{Eingang}}{2^n} \quad (3)$$

mit

$\Delta U_{Eingang}$  Eingangsspannungsbereich

n Bitzahl des ADC

Eine ganz entscheidende Rolle spielt dabei die vom Benutzer eingestellte vertikale Skalierung. Diese entspricht dem gesamten Eingangsspannungsbereich, oder auch dynamischen Bereich, des Wandlers. Wird beispielsweise ein 8-Bit Wandler verwendet und ist eine vertikale Auflösung von 50 mV/Div eingestellt, beträgt der kleinstmögliche darstellbare Schritt 2 mV. Wird hingegen auf eine vertikale Skalierung von 100 mV/Div gewechselt, so verdoppelt sich die minimale Auflösung auf 4 mV.

In Abbildung 9 ist dieser Sachverhalt dargestellt. In der rechten und linken Abbildung handelt es sich jeweils um das gleiche Signal, welches mit einer vertikalen Auflösung von 50 mV bzw. 100 mV aufgenommen wurde. In der linken Darstellung wurde der gesamte dynamische Bereich des ADCs (blauer Pfeil) ausgenutzt, was in einer besseren Auflösung des gemessenen Signals resultiert. Deshalb gilt bei Messungen mit Oszilloskopen immer:

- Für die höchstmögliche Genauigkeit sollte mit der Darstellung des Eingangssignals der gesamte dynamische Bereich des ADCs ausgenutzt werden.

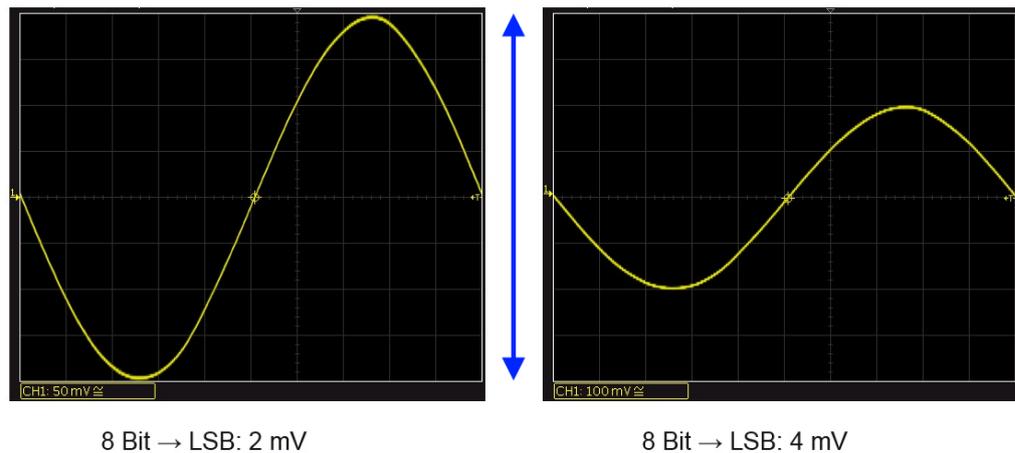


Abbildung 9: Vertikale Auflösung bei unterschiedlicher Skalierung

### 1.2.2 Sampling und Verarbeitung von Signalen

Neben der Auflösung des Wandlers ist dessen Geschwindigkeit von großer Bedeutung für viele Messaufgaben. Der A/D-Wandler nimmt in regelmäßigen Abständen zu bestimmten Zeitpunkten „Proben“ des kontinuierlichen Signals. Die digitalisierten Werte werden als Samples bezeichnet. Die Samplerate ist die Anzahl an Proben, die das Oszilloskop pro Sekunde nehmen kann. Im Fall des RTC1000 sind maximal 2 GSamples/s für einen Kanal und 500 GSamples/s im 2-Kanalbetrieb möglich.

Um das Signal korrekt darstellen zu können, ist eine ausreichende Samplerate von großer Bedeutung. Falls die Rate zu gering gewählt wird, kommt es zu Aliasing-Fehlern und das Signal wird verfälscht dargestellt. In diesem Fall spricht man von *Undersampling*. Abbildung 10 zeigt die Auswirkung geringer Sampleraten bei einem 10 kHz Eingangssignal.

In diesem Beispiel wurden die Abtastpunkte linear verbunden. Für gewöhnlich wird bei Oszilloskopen hierfür eine  $\frac{\sin(x)}{x}$ -Interpolation verwendet. Die Abtastrate muss dabei mindestens das 2,5-fache der maximalen Bandbreite des Oszilloskops betragen. Zusammenfassend führt eine hohe Abtastrate zu einer:

- Genauere Rekonstruktion von Signalen
- Besseren Erkennung kurzzeitig auftretende Anomalien (Glitches). Zu beachten ist, dass nur Anomalien die sich innerhalb der Bandbreite des Oszilloskops befinden, erkannt werden können.
- Höheren Dichte an Samples benötigt einen höheren Speicherbedarf

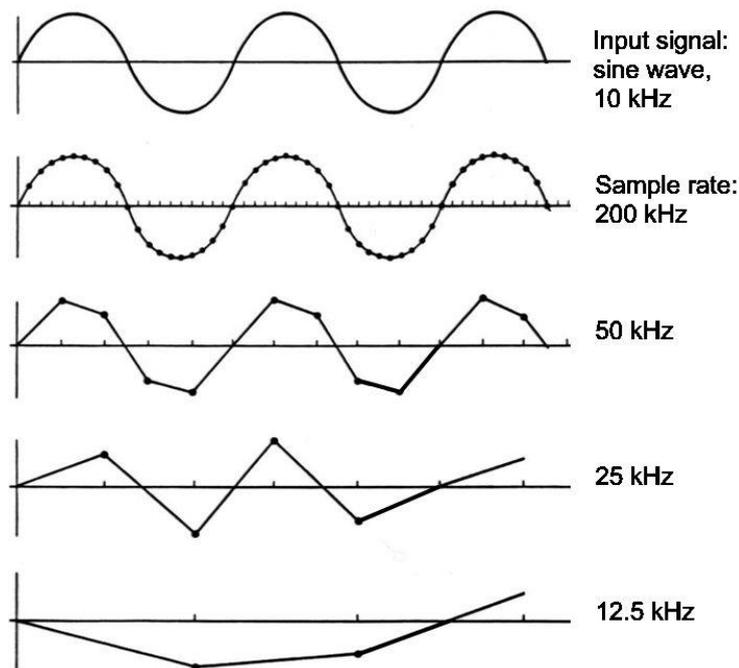


Abbildung 10: Auswirkung geringer Sample-Raten

Bandbreite und Samplerate sind für Oszilloskope sehr wichtige Eigenschaften und für sich allein betrachtet ist es in beiden Fällen wünschenswert höchstmögliche Werte zu erzielen. Beide Eigenschaften sind zwar nicht physikalisch gekoppelt, dennoch muss hier auf korrekte Dimensionierung geachtet werden.

Um gemessene Signale wirklich originalgetreu wiedergeben zu können ist gemäß dem Nyquist-Shannon-Theorem schon die doppelte Abtastrate, also  $2 \cdot f_{\text{signal,max}}$ , ausreichend. Aufgrund der nicht idealen Bandbegrenzung des Oszilloskops sollte die Samplerate in der Praxis als Daumenregel mindestens der 2,5-fachen Bandbreite des Oszilloskops entsprechen. Dennoch hat sich gezeigt, dass gerade für rechteckförmige Signale, deren Übergänge oftmals sehr schnell sind und wichtige Frequenzanteile deutlich über der Nyquistfrequenz beinhalten, für reproduzierbare Messungen ein Vielfaches der Bandbreite benötigt wird. Das RTC1000 ist beispielsweise maximal mit einer Bandbreite von 300 MHz verfügbar, während die höchstmögliche Samplerate 2 GSample/s beträgt.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig, sich folgendes zu merken:

- Eine hohe Bandbreite kann sehr viel weniger nützlich sein, falls nur eine geringe Samplerate verfügbar ist.

Bei allen augenscheinlichen Vorteilen stellt sich die Frage, warum nicht einfach immer das Oszilloskop mit der höchsten Sample-Rate verwendet werden sollte. Neben dem offensichtlichen Kostenfaktor durch die Konverter – eine höhere Abtastrate lässt sich mit teuren, schnelleren ADCs oder mehreren Wandlern, deren Samples zusammengerechnet werden realisieren – kann diese Frage bei Betrachtung der Speichertiefe beantwortet werden.

### Speichertiefe

Nachdem die Samples aufgenommen wurden, verarbeitet das Oszilloskop die Abtastwerte entsprechend den aktuellen Einstellungen. Das Ergebnis wird in den

Hochgeschwindigkeitsspeicher des Messgeräts übernommen. Die Speichertiefe gibt an, wie viele derartige Werte gespeichert werden können und legt somit die maximale Aufnahmedauer fest. Falls ein großer Zeitbereich bei voller Samplerate aufgenommen werden soll, muss das Oszilloskop folglich über eine entsprechend große Speichertiefe verfügen. Üblicherweise bricht die Messgeschwindigkeit von Oszilloskopen bei Nutzung des gesamten Speicherraums signifikant ein, da zur Verarbeitung der großen Datenmengen viel Rechenaufwand benötigt wird. Dies führt wiederum zu der im nächsten Absatz beschriebenen Blindzeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für eine hohe Samplerate nicht nur ein schneller Analog-Digital-Wandler von Nöten ist, sondern das Oszilloskop für reibungsfreie Arbeit auch über genügend Speichertiefe verfügen sollte. Beide Faktoren treiben den Preis eines Geräts erheblich in die Höhe, weshalb es ratsam ist, sich vor Anschaffung eines Oszilloskops über die erwarteten Anforderungen der Messungen im Klaren zu sein.

**Update Rate und Blindzeit**

Der Begriff der Update Rate wurde eingeführt, um dem Benutzer eine Größe an die Hand zu geben, welche eine Aussage über die Frequenz macht, mit der das Oszilloskop Messungen aufnehmen kann. Je höher die Update Rate desto mehr Akquisitionen kann das Oszilloskop pro Sekunde durchführen. (4)

Bei dieser Größe sollte jedoch beachtet werden, dass ein Oszilloskop nur zu einem Bruchteil der Zeit wirklich das anliegende Signal aufnimmt. Während der restlichen Zeit muss das Gerät den ankommenden Datenstrom verarbeiten und abspeichern. Das RTC1000 muss beispielsweise bei maximaler Samplerate (2 GSa/s) in Kombination mit dem 8-Bit ADC 16 GSamples/s an Daten verarbeiten. Die Interpolation der Messwerte und vom Benutzer ausgewählte mathematische-, oder Analysefunktionen verzögern die nächste Aufnahme zusätzlich. In dieser Zeit ist das Messinstrument „blind“, es können keine neuen Messungen gestartet werden. Als Konsequenz dauert es aufgrund dieser Blindzeit länger selten auftretende Fehler und Abweichungen im Signal zu erkennen und analysieren.

Abbildung 11 zeigt den Aufnahmezyklus eines Oszilloskops. Der feste Anteil der Blindzeit ist gerätespezifisch. Der variable Teil hingegen abhängig von den gewählten Aufnahme-, und Verarbeitungseinstellungen. In diesem Beispiel ist das Gerät zu 99.999% der Zeit mit der Verarbeitung der Daten beschäftigt. (4)

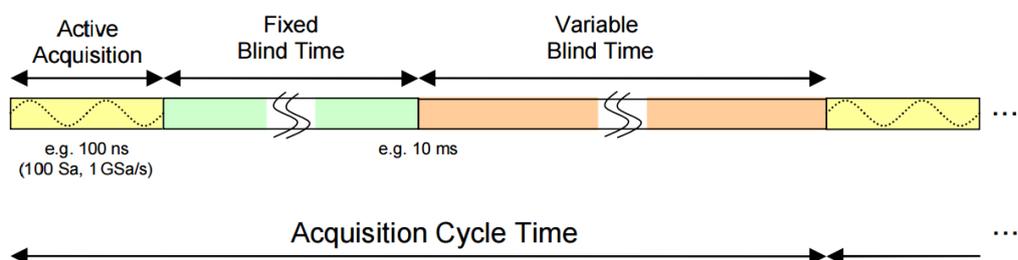


Abbildung 11 Aufnahmezyklus eines Oszilloskops

**Aufnahme Modi**

Viele Oszilloskope bieten mindestens 2 verschiedene Aufnahme Modi an, welche für unterschiedliche Einsatzzwecke gedacht sind.

*Real Time Modus*

Da der Analog-Digital-Wandler immer die gleiche Geschwindigkeit hat, wird bei Messung mit langsamer Zeitbasis durch Weglassen von Samples die Punkteanzahl dezimiert. Die abgetasteten Werte werden dementsprechend direkt für die Rekonstruktion des Signals verwendet.

Wurde eine schnellere Zeitbasis gewählt, werden die aufgenommenen Punkte des A/D-Wandlers mit interpolierten Werten ergänzt.

*Equivalent Time Modus*

Dieser Modus wird verwendet, um Signale zu analysieren, deren Frequenz weit über der Abtastfrequenz des Wandlers liegt. Allerdings sind hierfür stabile, sich wiederholende Signale Voraussetzung. Wenn das Oszilloskop im Equivalent Time Modus arbeitet, werden Punkte verschiedener Aufnahmen, welche an unterschiedlichen Stellen des periodischen Signals abgetastet wurden, zu einer Darstellung kombiniert.

**1.2.3 Grundlegendes Triggern**

Der Trigger bei Oszilloskopen wird unter Anderem benutzt, um eine stabile Darstellung sich wiederholender Signale zu erhalten. Eine weitere wichtige Anwendung ist die Synchronisierung der Aufnahme auf bestimmte Stellen des Signals, welche von besonderem Interesse sind. Wurde der Trigger ausgelöst, erstellt das Oszilloskop einen Schnappschuss des anliegenden Signals zu genau diesem Zeitpunkt.

Durch die Triggereinstellungen können die Bedingungen, unter denen ein Trigger auslösen soll genau festgelegt werden. Falls all diese Forderungen durch das Signal gleichzeitig erfüllt werden, legt dies den Triggerzeitpunkt fest. Das Oszilloskop hat bereits kontinuierlich Datenpunkte aufgenommen, welche nun verwendet werden, um den sogenannten Prätrigger Teil der Aufnahme zu füllen. Ab der Triggerung nimmt das Oszilloskop noch so viele Samples auf, bis der Posttrigger Teil des Speichers gefüllt ist und das Signal am Bildschirm angezeigt werden kann. Abbildung 12 zeigt den vereinfachten Aufbau eines digitalen Triggers. Bei diesem Typ arbeitet das Triggersystem direkt mit den ADC-Abtastwerten. (5)

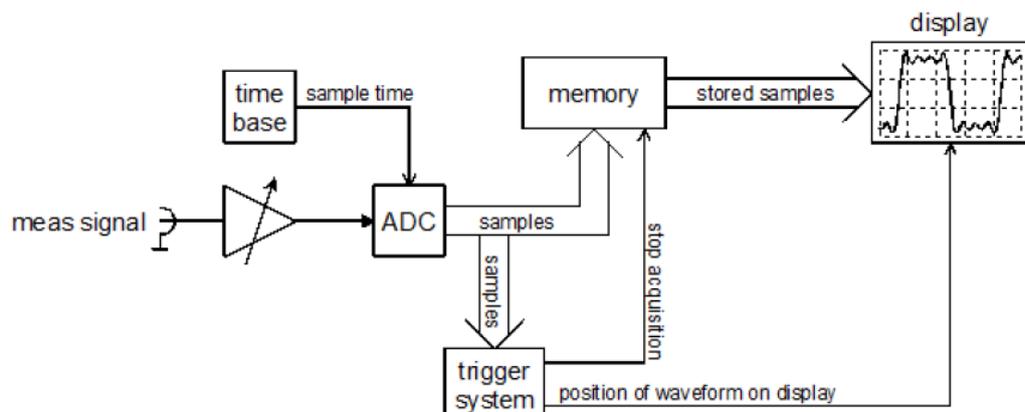


Abbildung 12: Vereinfachter Aufbau eines digitalen Triggers

Die meisten Oszilloskope unterstützen mindestens folgende Trigger-Bedingungen:

- Quelle des Signals
- Typ des Triggers mit verschiedenen Einstellungen
- Horizontale Position des Triggers
- Modus

Als Signalquelle kann im Fall des RTC1000 der Kanal 1, Kanal 2 sowie die digitalen Kanäle ausgewählt werden.

Moderne Oszilloskope bieten viele verschiedene Triggertypen an, von denen in diesem Kapitel nur auf den Edge-Trigger eingegangen werden soll. Dieser Typ löst aus, sobald das Signal die Triggerschwelle (vertikale Position des Triggers) überschritten hat. Zu den üblichen Einstellungsmöglichkeiten zählen die Höhe des Schwellwerts und Wahl von steigender oder fallender Flanke.

Durch die Speicherung von Samples vor und nach der Triggerzeit ist es möglich, die Aufnahme zu verschiedenen Prä- und Posttrigger Zeitpunkten in Ruhe zu analysieren. In den Triggereinstellungen kann der Zeitpunkt durch Variation der horizontalen Position des Triggers variiert werden.

Jedes Oszilloskop unterstützt 2 grundlegende Triggermodi. Beide Modi unterscheiden sich nur im Verhalten, falls die Bedingungen für ein Triggerereignis nicht erfüllt werden. Für die folgenden Beschreibungen wird also davon ausgegangen, dass das Signal die Triggerschwelle nicht überschreitet.

#### **Auto-Modus**

Befindet sich das Oszilloskop im Auto-Modus verwendet das Gerät erst die eingestellte Triggerbedingung. Wird diese innerhalb einer bestimmten Zeit nicht erfüllt wird ein asynchroner Trigger generiert, wodurch das Signal zu zufälligen Zeitpunkten angezeigt wird. Der Vorteil hierbei ist, dass generell geprüft werden kann, ob ein Signal anliegt und welche Amplituden dieses aufweist.

#### **Normal-Modus**

Wurde hingegen der Normal-Modus gewählt, aktualisiert das Oszilloskop so lange seinen Bildschirm nicht, bis die Triggerbedingungen erneut erfüllt werden. Dieser Modus ist vorzuziehen, falls mit einem sehr seltenen Triggerereignis zu rechnen ist.

In Abbildung 13 sind einige verschiedene Einstellungen für den Edge-Trigger des RTC1000 und deren Auswirkung dargestellt. Die ausgefüllten Pfeile am Rand des Graphen zeigen jeweils die horizontale und vertikale Position des Triggers an, welche hier durch einen roten Kreis zusätzlich hervorgehoben wurde.

In Teilbild ① wurde das Triggersystem noch nicht korrekt eingestellt. Der Triggerlevel ist zu hoch gewählt, weshalb sich kein gültiges Triggerereignis ergibt. Mit diesen Einstellungen kann kein stehendes Bild erzeugt werden. Das Oszilloskop befindet sich offensichtlich im Auto-Modus, da es das asynchron getriggerte Signal anzeigt. In Teilbild ② wurde der Trigger auf steigende Flanke und 0 V Triggerlevel eingestellt. Für Teilbild ③ wurde der Trigger auf fallende Flanke umgestellt, der horizontale Triggeroffset (hier:  $-10 \mu\text{s}$ ) jedoch so gewählt, dass auf den ersten Blick kein Unterschied zu Teilbild ② zu erkennen ist. Das letzte Teilbild zeigt, dass sich die Darstellung für Trigger mit steigender und fallender Flanke auch kombinieren lässt. Dadurch kann beispielsweise die Symmetrie eines Signals untersucht werden.

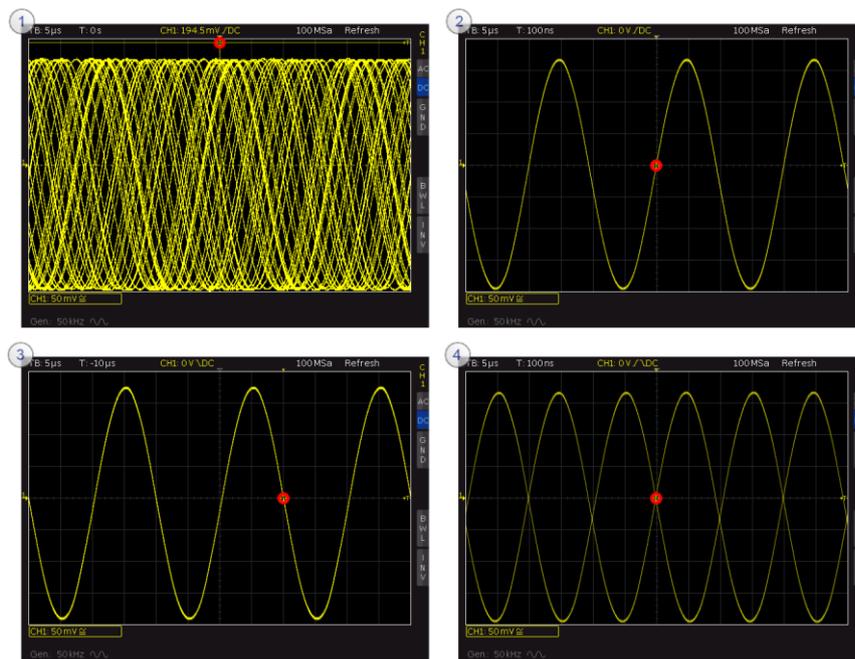


Abbildung 13: Auswirkung verschiedener Trigger-Einstellungen

## 2 Vorbereiten praktischer Messungen

Mit diesem Kapitel beginnt der praktische Teil der Educational Note. In den nächsten Abschnitten finden Sie allgemeine Messaufgaben, die Grundlagenwissen vermitteln und für die Analyse und Verifikation elektronischer Schaltungen an der Tagesordnung sind.

Nachfolgend sollen noch vor Beginn der eigentlichen Messungen ein paar Punkte genannt werden, die es bei Verwendung von Oszilloskopen zu beachten gilt.

**Mit einem passiven Tastkopf wird grundsätzlich nur gegen Masse gemessen!**

Ein Oszilloskop misst zwar grundsätzlich Spannungen wie auch ein Multimeter, allerdings kann es im Messaufbau nicht wie ein solches benutzt werden. Der Masse-Clip eines Tastkopfes muss stets mit Masse verbunden werden, da der Schaltungsknoten ansonsten kurzgeschlossen wird. Abbildung 14 zeigt den Effekt einer falsch durchgeführten Messung. Der rote Pfeil entspricht hierbei der Spitze des Tastkopfes und der graue Pfeil dem Masse-Clip. Wie im rechten Bildausschnitt zu erkennen, wird die Schaltung komplett außer Betrieb gesetzt. Sinnvolle Messungen sind hier nicht mehr möglich! In ungünstigen Fällen kann durch einen solchen Masseschluss auch ernsthafter Schaden entstehen.

Für differentielle Messungen können beispielsweise differentielle Tastköpfe benutzt werden.

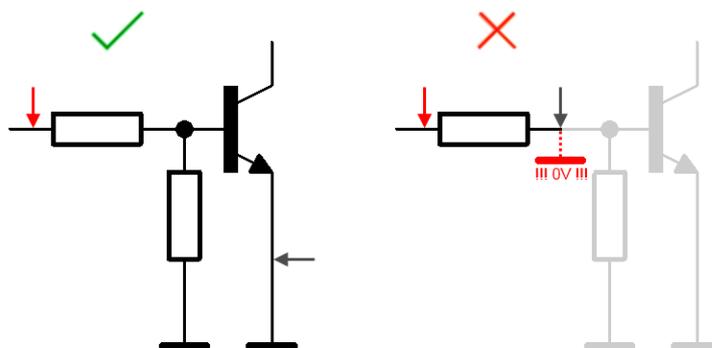


Abbildung 14: Korrektes Messen mit dem Oszilloskop

**Passive Tastköpfe müssen kompensiert und das Teilungsverhältnis dem Oszilloskop bekannt sein!**

Wie in Kapitel 1.1.3 beschrieben, müssen alle verwendeten Tastköpfe vor den Messungen kompensiert werden. Um diesen Schritt mit dem RTC1000 durchzuführen, drücken Sie den Knopf *Setup*, der unter *General* gruppiert ist. Durch den Punkt *PROBE ADJUST* des nun erschienenen Untermenüs gelangen Sie in den Assistenten zur Durchführung der Kompensation. Nachdem ein Tastkopf wie auf dem Bildschirm beschrieben angeschlossen wurde, muss der entsprechende Kanal ausgewählt werden. Abbildung 15 zeigt eine LF-Kompensation an Kanal 1. Durch die Auswahl *NEXT STEP* kann die HF-Kompensation durchgeführt werden.

► Führen Sie eine Kompensation an beiden Kanälen durch.

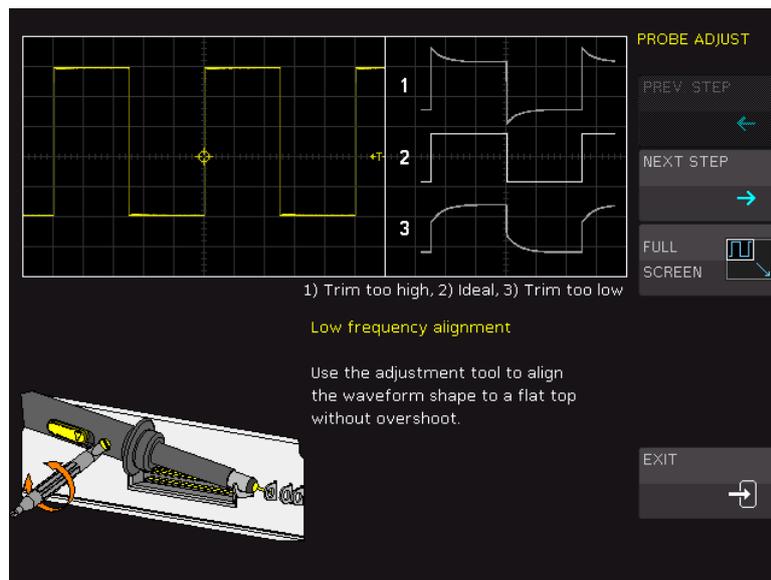


Abbildung 15: Durchführung der Kompensation

Nach erfolgreicher Kompensation sollte sichergestellt werden, dass dem Oszilloskop das korrekte Teilungsverhältnis der Tastköpfe bekannt ist. Kontrollieren Sie zuerst, dass die Schieber beider Tastköpfe auf 10:1 (x10) gestellt sind. Durch die Taste *MENU* in der Gruppierung für das vertikale System und der Auswahl *PROBE* auf dem Bildschirm (Seite 2) kann das Teilungsverhältnis eingestellt werden. Der Kanal lässt sich durch Drücken der *CH1 / CH2* Taste wechseln.

**Nach jedem Preset müssen die Tastverhältnisse neu eingestellt werden!**

Anmerkung: Höherklassige Geräte wie beispielsweise R&S® RTM3000 oder R&S® RTO bieten mit geeigneten Tastköpfen eine automatische Erkennung des Teilungsverhältnisses. Fast alle modernen Oszilloskope bieten eine Autoset-Funktion, die automatisch alle notwendigen Einstellungen am Gerät vornimmt, um das anliegende Signal optimal darzustellen. Im Berufsalltag kann diese Funktion sehr komfortabel sein, allerdings ist es hier aus didaktischen Gründen besser, auf diese Funktion zu verzichten. Wenn Sie ausreichend Sicherheit im Umgang mit Oszilloskopen haben, können Sie Autoset wieder verwenden, um einen ersten Überblick über das gemessene Signal zu erhalten. Das RTC1000 bietet einen Education-Modus, welcher die Autoset-Funktion sowie alle automatischen Messungen deaktiviert. Dieser Modus kann bei Bedarf per Passwort gesichert werden.

- ▶ Aktivieren Sie den Education-Modus über *SETUP* → *EDUCATION MODE* (Seite 3).

**Führen Sie alle Versuche in dem Education-Modus durch!**

Über den Knopf  $\frac{SAVE}{RECALL}$  und Auswahl von *DEVICE SETTINGS* → *DEFAULT SETT.* kann das Oszilloskop auf die Grundeinstellungen zurückversetzt werden.

**Das Gerät sollte vor jedem Versuch auf Grundeinstellungen mit Preset zurückgesetzt werden!**

Im Verlauf der Versuche finden Sie einige Fragen, die zum Nachdenken anregen sollen und zu einem besseren Verständnis des Versuchs führen. Die Fragen sind durch kursiven Text und ein *?*-Symbol gekennzeichnet. Der Großteil der Fragen kann als Vorbereitung auch schon vor Versuchsdurchführung bearbeitet werden.



### 3.2 Versuchsdurchführung

- ▶ Versetzen Sie das Oszilloskop in den Grundzustand (*PRESET*).
- ▶ Stellen Sie für Kanal 1 das Tastverhältnis 1:1 und für Kanal 2 das Tastverhältnis 10:1 ein, siehe auch Kapitel 2.

Das RTC1000 besitzt sowohl einen integrierten Funktions- wie auch einen Testmuster-generator. Für die ersten Messungen wird der Funktionsgenerator genutzt, dessen Ausgangssignal über die BNC-Buchse *AUX OUT* abgegriffen werden kann.

- ▶ Verbinden Sie den Funktionsgenerator über ein BNC-Kabel mit dem Eingang von Kanal 1.

Um den Generator anzuschalten, müssen Sie den Knopf *UTIL* in der *VERTICAL*-Gruppierung drücken und auf dem Bildschirm *FUNCTION GEN.* auswählen.

- ▶ Aktivieren Sie den Funktionsgenerator und verlassen Sie das Menü über die -Taste.

Der Funktionsgenerator erzeugt nun ein 1 kHz Sinussignal mit einer Spitze-Spitze Spannung von 500 mV.

Das Fadenkreuz in der Mitte des Bildschirms zeigt - zusammen mit den ausgefüllten Pfeilen am linken und oberen Bildrand - die aktuelle Triggerposition an.

- ▶ Erzeugen Sie am Oszilloskop durch Einstellen der horizontalen und vertikalen Skalierungen sowie des Triggerschwellwertes ein stehendes, zu Abbildung 17 ① ähnliches Bild.

Durch zweimaliges Drücken der *CH2*-Taste kann die Darstellung des zweiten Kanals bei Bedarf deaktiviert werden.

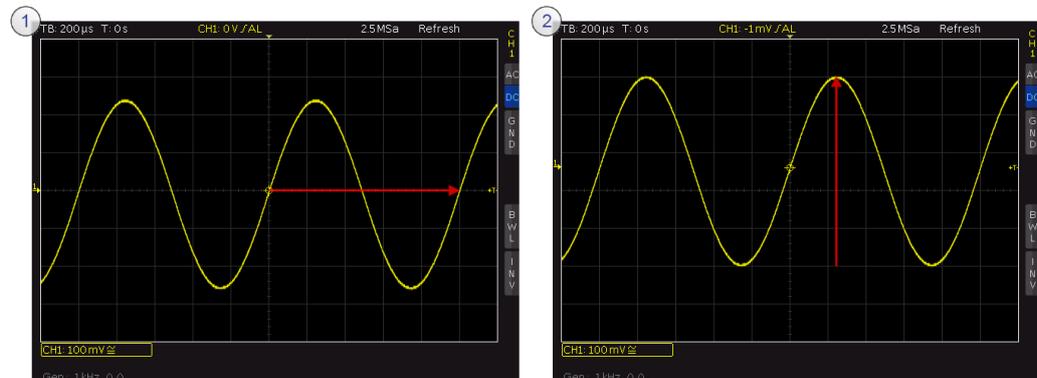


Abbildung 17: Messung der Periode und Peak-to-Peak Spannung einer Sinusfunktion

- ▶ Lesen Sie die Frequenz der Sinusfunktion durch Abzählen der Kästchen und Beachtung der horizontalen Skalierung ab. (Auch wenn diese schon bekannt ist!)

Durch Variation des vertikalen Offsets, kann eine Darstellung wie in Abbildung 17 ② erreicht werden, welche es ermöglicht die Amplitude des Signals exakter abzulesen.

- ▶ Ermitteln Sie die Spitze-Spitze Spannung des Sinussignals und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit den Einstellungen des Funktionsgenerators.

Durch die gerade angewandte Methode können keine exakten Messungen durchgeführt werden. Für schnelle Abschätzungen ist die visuelle Analyse gut geeignet, sogenannte Cursormessungen liefern jedoch deutlich genauere Ergebnisse.

Nach Rücksetzen auf die Grundeinstellungen hat das Oszilloskop automatisch den Edge-Trigger verwendet. Wie Sie sehen konnten, ist es bei Sinusfunktionen günstig auf fallende oder steigende Flanke zu triggern. Auch für rechteckförmige Signale ist diese Triggerart sehr gut geeignet.

► Stellen Sie den Funktionsgenerator auf ein Pulssignal mit 10 kHz Frequenz ein und lassen Sie die restlichen Parameter unverändert. Verwenden Sie den Knopf *KEYPAD* um die Frequenz einzustellen.

Auch dieses Signal wird mit den aktuellen Einstellungen richtig getriggert.

► Passen Sie die horizontale Skalierung so an, dass Sie optimal eine Pulsbreite messen können.

Unter der Gruppierung *CURSOR/MENU* finden Sie den Knopf *CURSOR MEASURE*.

► Öffnen Sie das Cursor-Menü und wählen Sie die Zeitmessung.

Die jetzt angezeigten Marker können mittels des *SELECT*-Drehknopfes horizontal verschoben werden. Für Feineinstellungen muss die Taste  $\frac{COARSE}{FINE}$  aktiviert sein. Durch Drücken des Drehknopfes *SELECT* wird der aktive Cursor umgeschaltet.

► Messen Sie die Breite des Pulses, eine Beispielmessung ist in Abbildung 18 dargestellt. Die Breite eines Pulses wird bei 50 % der eingeschwungenen Amplitude gemessen.

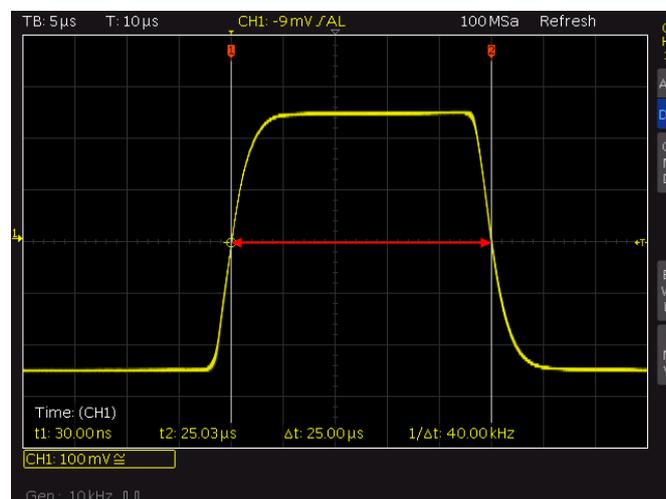


Abbildung 18: Cursormessung einer Pulsbreite

► Messen Sie zusätzlich das Tastverhältnis des Signals.

In Abbildung 18 kann die endliche Anstiegszeit des Pulses erkannt werden. Je nach Busspezifikation wird die 10% -90% (für beispielsweise TTL) oder 20 % - 80 % (für schnelle auf LVDS basierende Busse) Definition verwendet, um die Anstiegszeit zu messen. Das bedeutet, dass die Zeit, bis die Amplitude von 20 % ausgehend 80 % des eingeschwungenen Endwertes erreicht hat, als Anstiegszeit definiert wird.

- ▶ Stellen Sie das Oszilloskop so ein, dass Sie die Anstiegszeit gut messen können.

Abbildung 19 zeigt beispielhaft, wie das Display des RTC1000 optimal eingerichtet ist, um die Anstiegszeit  $t_A$  zu messen. Wichtig ist, dass für 0 % und 100 % jeweils der eingeschwungene Zustand angenommen wird.

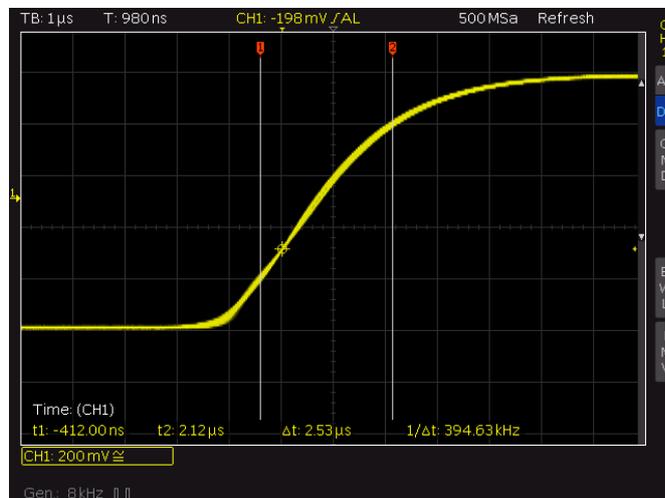


Abbildung 19: Messung der Anstiegszeit eines Pulses

? Welche Bandbreite müsste ein Oszilloskop mindestens aufweisen, um das Signal aus Abbildung 19 mit 10 % Genauigkeit zu messen? Nutzen Sie hierfür die Formel (1).

- ▶ Messen Sie die Anstiegszeit für den Puls und berechnen Sie die benötigte Oszilloskopbandbreite in Ihrem Fall.

Der Menüpunkt *MEASURE TYPE* bietet auch eine Vielzahl automatischer Messungen an.

- ▶ Wählen Sie *Rise Time 80%* aus und setzen Sie die Cursor so, dass Anstiegs- und Fallzeit gleichzeitig gemessen werden können, siehe Abbildung 20.

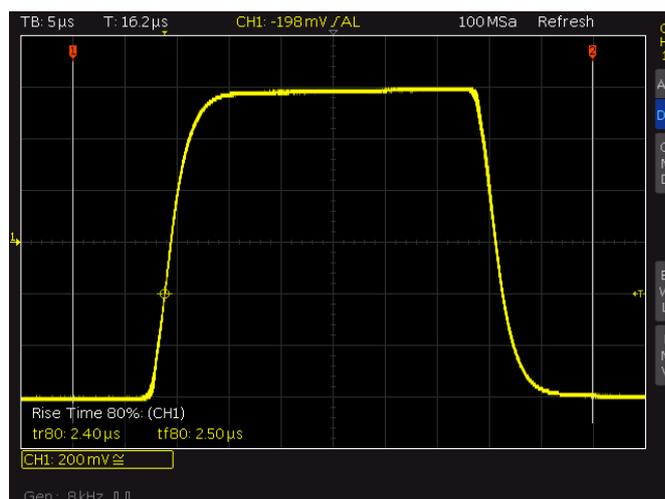


Abbildung 20: Automatische Cursor-Messung

- ▶ Vergleichen Sie die Ergebnisse.

Die automatischen Messungen sind für schnelle Analysen sehr gut geeignet. Wie Sie selber gesehen haben, kann allerdings nur wenig Einfluss auf die Messung an sich genommen werden. Deshalb gilt bei diesen Messungen immer: Wurde die Automatik beim Messen zur Hilfe genommen, muss stets zumindest die Plausibilität des Ergebnisses manuell geprüft werden!

Oftmals ist es von Interesse, zwei Signale gleichzeitig messen zu können. Hierzu besitzt das RTC1000 zwei unabhängige Eingänge.

► Verbinden Sie wie in Abbildung 16 dargestellt den Kanal 2 mit dem Ausgang *S0*. Denken Sie unbedingt daran, auch die Masse des Tastkopfes zu verbinden.

Durch Drücken der Taste *CH2* kann der Kanal 2 ausgewählt werden, wiederholtes Drücken der *CH1* oder *CH2*-Taste blendet den jeweiligen Kanal ein oder wieder aus.

► Aktivieren Sie die Darstellung von Kanal 2. Blenden Sie Kanal 1 vorerst aus.

Das zu messende Signal liegt an Kanal 2 an. Dementsprechend muss dem Oszilloskop bekannt sein, dass der Trigger auf diesen Kanal ansprechen soll.

► Wählen Sie unter der Gruppierung *TRIGGER* den Knopf *SOURCE* und dort *CHANNEL 2* aus.

Als Signalquelle für Kanal 2 wird der Testmustergenerator verwendet. Dieser ist für höhere Frequenzen als der Signalgenerator des RTC1000 ausgelegt. Dementsprechend sind die Signalfanken deutlich steiler.

Der Testmustergenerator kann wie der Signalgenerator über den Knopf *UTIL* angewählt werden.

► Aktivieren Sie den *PATTERN GENERATOR* und wählen Sie *SQUARE WAVE* aus. Übernehmen Sie die restlichen Einstellungen ohne Änderung.

► Führen Sie an diesem Signal noch einmal eine Anstiegszeitmessung durch und berechnen Sie nun die benötigte Oszilloskopbandbreite für 10 % Genauigkeit.

? *Ist das RTC1000 für genaue Zeitmessungen an diesem Signal noch verlässlich benutzbar?*

Nachfolgend soll die Auswirkung kleinerer Bandbreiten auf das gemessene Signal verdeutlicht werden.

► Stellen Sie hierzu den Testmustergenerator auf die höchstmögliche Frequenz ein und zoomen Sie durch Skalieren Sie an eine fallende Flanke heran. (Hierfür Trigger auf fallende Flanke stellen.)

Nach Drücken der Taste *MENU* kann die Bandbreite für den Kanal auf 20 MHz reduziert werden.

► Beobachten Sie die geänderte Signaldarstellung.

? *Welche Vorteile könnte die Bandbreitenbegrenzung bei Messungen haben? Woher rührt die Welligkeit in dem ungefilterten Signal (siehe Abbildung 21)?*

► Schalten Sie die Bandbreitebegrenzung wieder aus.

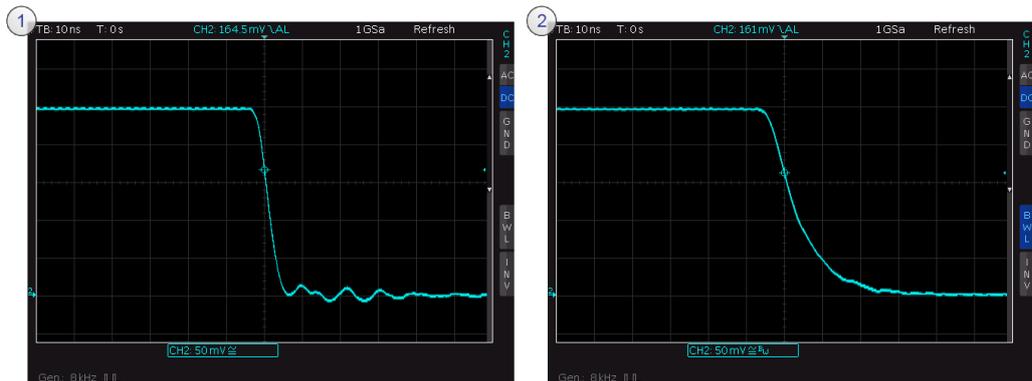


Abbildung 21: Vergleich bei der Messung mit voller und limitierter Bandbreite

- ▶ Aktivieren Sie nun beide Kanäle.
- ▶ Stellen Sie für die Puls- und Rechteckfolge des Signal- und Testmustergenerators folgende Parameter ein:

FREQUENCY	10 kHz
DUTY CYCLE	50 %

und teilen Sie den Bildschirm in eine Darstellung für Kanal 1 und 2 auf, siehe Abbildung 22.

Viele Signale besitzen sowohl DC- wie auch AC-Anteile. Manchmal sind nur die Wechselspannungsanteile für den Anwender interessant. In diesem Fall empfiehlt es sich, das sogenannte AC-Coupling zu verwenden. Mit aktiviertem AC-Coupling wird ein 2 Hz Eingangsfilter vorgeschaltet, der Gleichspannungsanteile unterdrückt.

? *Welches Ergebnis erwarten Sie bei unterdrückter Gleichspannung und den vorliegenden Signalen (Abbildung 22)?*

- ▶ Drücken Sie die Taste *MENU* und wählen Sie unter *COUPLING* die Option *AC* für beide Kanäle aus. Verifizieren Sie Ihre Erwartung.

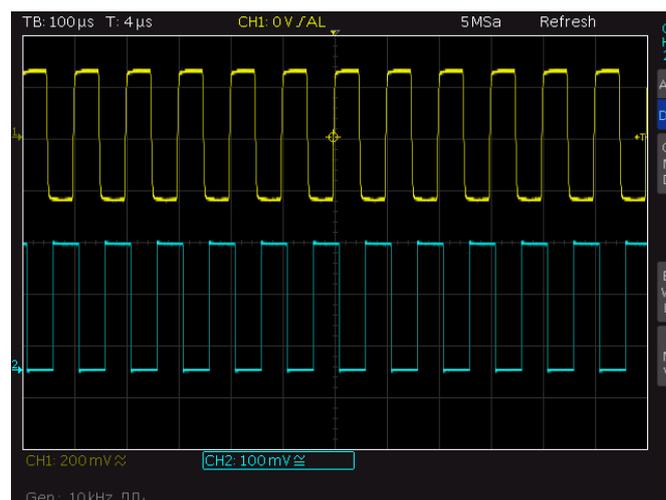


Abbildung 22: Darstellung beider Kanäle gleichzeitig mit DC-Coupling

Im Allgemeinen Fall wird für Messungen DC-Coupling verwendet.

- ▶ Wählen Sie wieder DC-Coupling aus, damit alle Signalanteile sichtbar sind.

Im letzten Teil dieses Versuchs soll noch eine neue Darstellungsart vorgestellt werden: Die sogenannte XY-Darstellung.

Wie Sie in Kapitel 1.1.1 gelernt haben, stellt ein Oszilloskop eine Variable als Funktion einer anderen dar. Meist wird die Darstellung einer Spannung über die Zeit verwendet, in bestimmten Fällen kann es jedoch sehr nützlich sein, die beiden unabhängigen Kanäle des Oszilloskops als X- und Y-Achse zu verwenden. Dies ermöglicht beispielsweise die Darstellung von Diodenkennlinien.

► Schließen Sie das Versuchsboard aus Anhang 61A.1 wie in Abbildung 16 gezeigt an die USB-Buchse an.

Anschließend muss das Versuchsboard so konfiguriert werden, dass am Ausgang ANA ein Sinus abzugreifen ist.

► Wechseln Sie mit Hilfe der beiden Taster in den Zustand ② aus Tabelle 2.

► Greifen Sie am Ausgang ANA das Signal mit dem an Kanal 2 angeschlossenen Tastkopf ab.

► Führen Sie eine Cursor-Messung durch um die Frequenz und Amplitude des an Kanal 2 gemessenen Sinussignals zu bestimmen.

Der XY-Betrieb ist nicht nur für die Vermessung von Bauteilkennlinien sehr praktisch sondern kann auch zur Ermittlung der Phasendifferenz zweier Signale eingesetzt werden.

Sie haben bereits den integrierten Signalgenerator des Oszilloskops kennengelernt.

► Konfigurieren Sie den Signalgenerator so, dass an Kanal 1 ein möglichst ähnliches Signal wie der gerade an Kanal 2 vermessene Sinus anliegt.

Beim Wechsel in den XY-Betrieb wird eine ovale Figur angezeigt. Die Phasenlage der beiden Signale lässt sich anhand von Form und Lage der angezeigten Figur ablesen, siehe Abbildung 23.

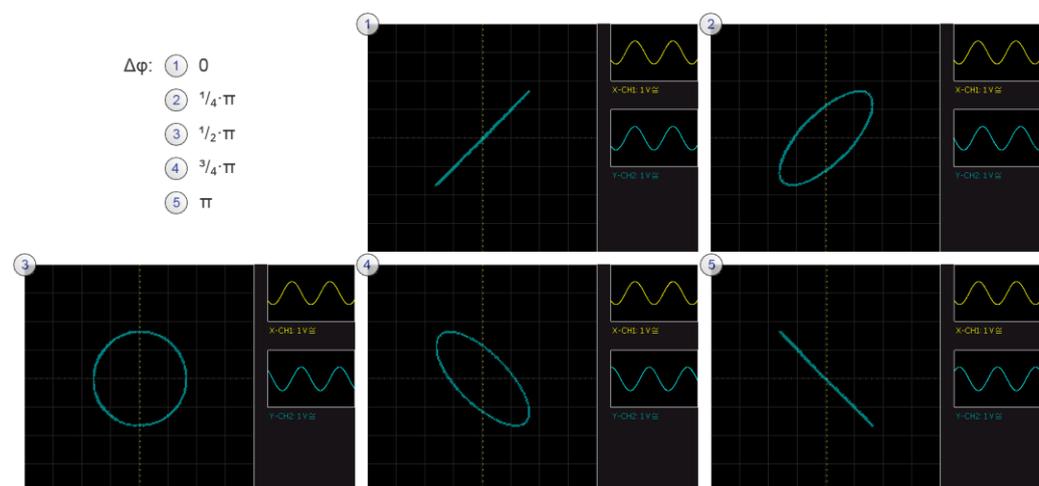


Abbildung 23: Abbildungen im XY-Betrieb für das Frequenzverhältnis 1:1

Im Fall des RTC1000 kann über die Taste *UTIL* und anschließende Auswahl des Menüpunktes *XY* in den XY-Betrieb gewechselt werden.

► In welcher Phasenlage liegen in Ihrem Fall die Signale zueinander?

▶ Variieren Sie die Frequenz des Signalgenerators in kleinen Schritten. Was können Sie in der Standarddarstellung und im XY-Betrieb beobachten?

Die im XY-Betrieb erzeugten Abbildungen werden Lissajous-Figuren genannt.

▶ Stellen Sie das Frequenzverhältnis 3:1 ein und beobachten Sie die Auswirkungen.

## 4 Dokumentieren und Speichern

Dieses Kapitel beinhaltet eine praktische Einführung in die Dokumentation von Messungen mit Oszilloskopen. Gerade bei geteilter Nutzung von Messinstrumenten, wie es in der Universitätsumgebung in der Regel der Fall ist, kann es sich als sehr praktisch erweisen alle Einstellungen und auch Messdaten für eine spätere Benutzung auf ein persönliches Speichermedium übertragen zu können.

Um diesen Versuch durchzuführen, sollten Sie ein USB-Flashdrive zur Hand haben.

Das RTC1000 kann unterschiedliche Arten von Information abspeichern um Messungen zu dokumentieren oder aktuelle Einstellungen zu sichern:

- **Geräteeinstellungen**  
Geräteeinstellungen für späteren Import. Die Daten können lokal oder extern gespeichert werden.
- **Referenzen**  
Datensätze, die aus den Geräteeinstellungen und den A/D-Wandlerdaten bestehen. Intern sowie extern speicherbar.
- **Kurven**  
Messergebnisse, die nur aus den A/D-Wandlerdaten bestehen und extern abgespeichert werden können.
- **Screenshots**  
Bilddateien, in denen die zum Zeitpunkt des Abspeicherns aktuellen Bildschirmhalte zu sehen sind.

### 4.1 Versuchsaufbau

Das Setup für diesen Versuch (siehe Abbildung 24) ist mit dem ursprünglichen Versuchsaufbau aus dem Kapitel 3.1 identisch.

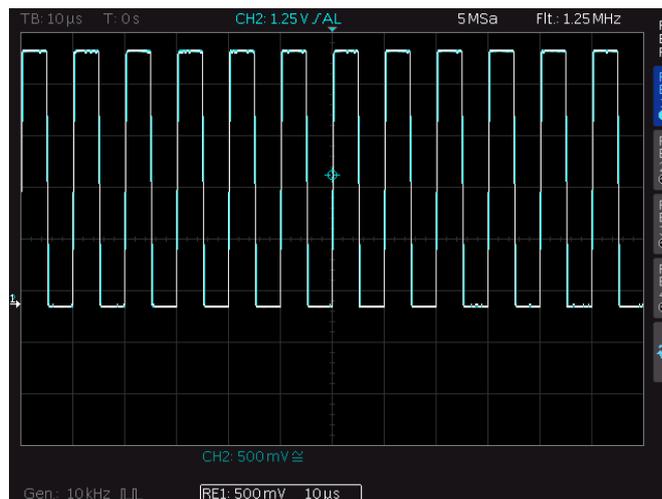


- ▶ Öffnen Sie das Menü für Referenzsignale und wählen Sie den Unterpunkt *RE1* aus.
- ▶ Speichern Sie das Signal durch die Auswahl *SAVE* und Konfiguration folgender Parameter:

TRACE	CH2
STORAGE	INTERNAL

Eine Ebene im *REFERENCES* Menü höher können Sie durch die Auswahl *DISPLAY* das Referenzsignal sichtbar machen.

Auf dem Display sollte nun eine Darstellung ähnlich Abbildung 25 zu sehen sein. Das weiße Signal stellt dabei die abgespeicherte Referenz dar.



**Abbildung 25: Abgespeichertes Referenzsignal**

Um den Tausch eines Filters zu simulieren, ist der integrierte Tiefpassfilter des Oszilloskops hilfreich.

Die Grenzfrequenz des Filters kann abhängig von der aktuellen Samplefrequenz eingestellt werden. Um eine möglichst tiefe Grenzfrequenz zu erhalten, muss die Samplegeschwindigkeit des Oszilloskops verringert werden.

- ▶ Drücken Sie unter Gruppierung *HORIZONTAL* den *ACQUIRE*-Knopf und wählen Sie dort die Option *RECORD MODE* → *MAX. WFM. RATE*.

Durch diese Einstellung wird die Samplerate reduziert um eine maximale Triggerwiederholrate zu erreichen.

- ▶ Wählen Sie im *ACQUIRE*-Menü die Option *ARITHMETIC* → *FILTER*.

Durch Betätigung des Universaldrehknopfes (*SELECT*) können Sie die Grenzfrequenz in dem durch die Samplefrequenz definierten Rahmen einstellen.

Mit der aktuellen Darstellung (siehe Abbildung 26) ist es nun möglich die beiden Signale anschaulich vergleichen.

- ▶ Experimentieren Sie mit den Einstellungen und testen Sie, ab welchem Vielfachen der Grundfrequenz die Rechteckfunktion zufriedenstellend dargestellt wird.
- ▶ Stellen sie unter *ACQUIRE* die Aufnahmeoptionen wieder auf den Standard zurück:

<i>ARITHMETIC</i>	<i>REFRESH</i>
-------------------	----------------

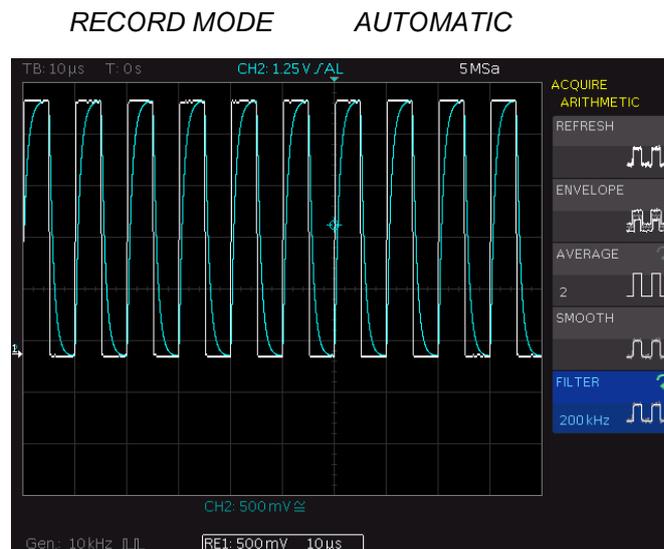


Abbildung 26: Vergleich eines Signals mit der Referenz

### Speichern einer Messkurve für externe Analyse:

Bei vielen Anwendungen ist die Analyse auf dem Bildschirm des Oszilloskops nicht ausreichend. Oftmals müssen die Daten an einem Computer noch genauer ausgewertet und verarbeitet werden. Aus diesem Grund ist es möglich, die durch den A/D-Wandler aufgenommenen Werte direkt auf ein USB-Flashdrive zu laden.

- ▶ Schließen Sie den USB-Stick an die Frontbuchse an.
- ▶ Deaktivieren Sie die Darstellung des Referenzsignals durch doppeltes Tippen auf die *REF*-Taste im Bedienfeld.
- ▶ Konfigurieren Sie den Signalgenerator so, dass folgendes Signal erzeugt wird:

FUNCTION	RAMP
FREQUENCY	10 kHz
AMPLITUDE	500 mVpp

- ▶ Stellen Sie das Signal auf Kanal 1 dar.

Durch den Knopf  $\frac{SAVE}{RECALL}$  wird ein Menü geöffnet, das auch die Konfiguration des Knopfes  $\frac{FILE}{PRINT}$  erlaubt.

- ▶ Übernehmen Sie im Unterpunkt TRACES die Einstellungen aus Abbildung 27:

STORAGE	FRONT USB
TRACE	CH1
FORMAT	CSV



Abbildung 27: Speichern einer Aufnahme

Vor dem Speichern des Signals sollte die Aufnahme gestoppt werden, um die maximale Anzahl an Werten zu nutzen.

- ▶ Stoppen Sie die Aufnahme durch den Knopf  $\frac{RUN}{STOP}$ .
- ▶ Kehren Sie in das Hauptmenü zurück und wählen Sie unter der Option *KEY* den Punkt *TRACES*.

Nun ist der Knopf  $\frac{FILE}{PRINT}$  so konfiguriert, dass durch Betätigung automatisch die aktuellen ADC-Werte auf das USB-Flashdrive abgespeichert werden.

- ▶ Speichern Sie nun den Signalverlauf mittels des Knopfes  $\frac{FILE}{PRINT}$ .

Nach diesem Schritt liegen die ADC-Werte im von Excel lesbaren .csv Format auf Ihrem USB-Stick.

Wenn Sie zur Auswertung einen Computer zur Hand haben, können Sie die Datei in Excel öffnen und wie in Abbildung 28 ein Diagramm mit den Daten erstellen.

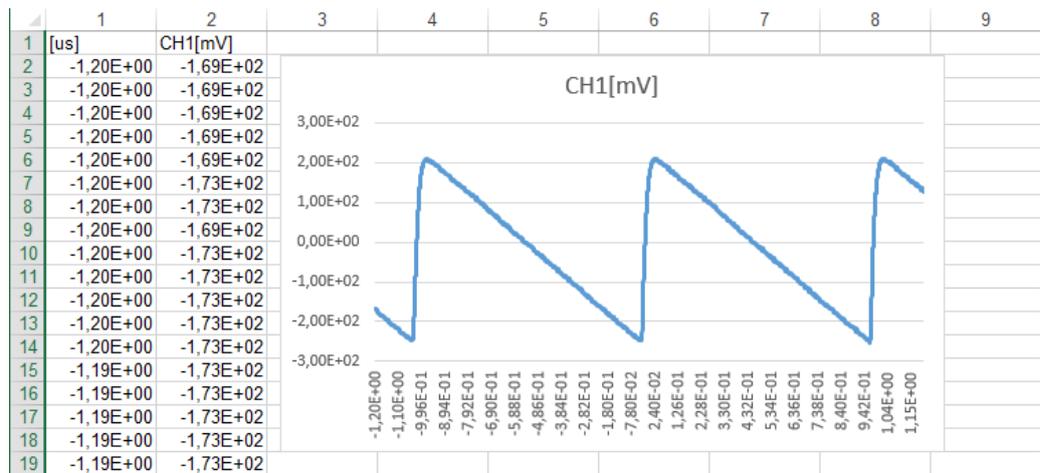


Abbildung 28: Importierung der Daten in Excel

### Speicherung von Bildschirmausdrucken:

Auch wenn Screenshots im Gegensatz zu den oberhalb beschriebenen Formaten nicht wieder in das Gerät geladen werden können, sind diese dennoch ein sehr gut geeignetes Format für die Dokumentation von Messungen.

Am komfortabelsten ist die Einstellung des  $\frac{FILE}{PRINT}$ -Knopfes derart, dass bei Betätigung ein Screenshot auf den USB-Stick gespeichert wird. Im *KEY*-Untermenü des  $\frac{SAVE}{RECALL}$ -Knopfes kann das Verhalten des Knopfes dementsprechend konfiguriert werden.

- Konfigurieren Sie den  $\frac{FILE}{PRINT}$ -Knopf wie beschrieben und speichern Sie einen Bildschirmausdruck, ähnlich dem von Abbildung 27 auf das USB-Flashdrive.

## 5 Fortgeschrittene Trigger-Einstellungen

Ziel dieses Kapitels ist es, auf den Grundlagen von Kapitel 1.2.3 aufzubauen und dem Leser fortgeschrittene Anwendungen des Trigger-Systems zu vermitteln. Der Versuch zeigt, wie Sie geeignete Trigger bei komplexeren Messaufgaben richtig auswählen und konfigurieren.

### 5.1 Versuchsaufbau

Für den Versuchsaufbau wird der interne Signalgenerator des Oszilloskops mit Kanal 1 verbunden, das Versuchsboard aus Anhang A.1 an Kanal 2 angeschlossen und über die USB-Buchse mit Strom versorgt. Abbildung 29 stellt diesen Aufbau in seiner Gesamtheit dar. Der an Kanal 2 angeschlossene Tastkopf ist zunächst mit dem *UART/LIN*-Ausgang der Platine und im späteren Verlauf des Versuchs mit dem Ausgang *SIGNAL* verbunden.

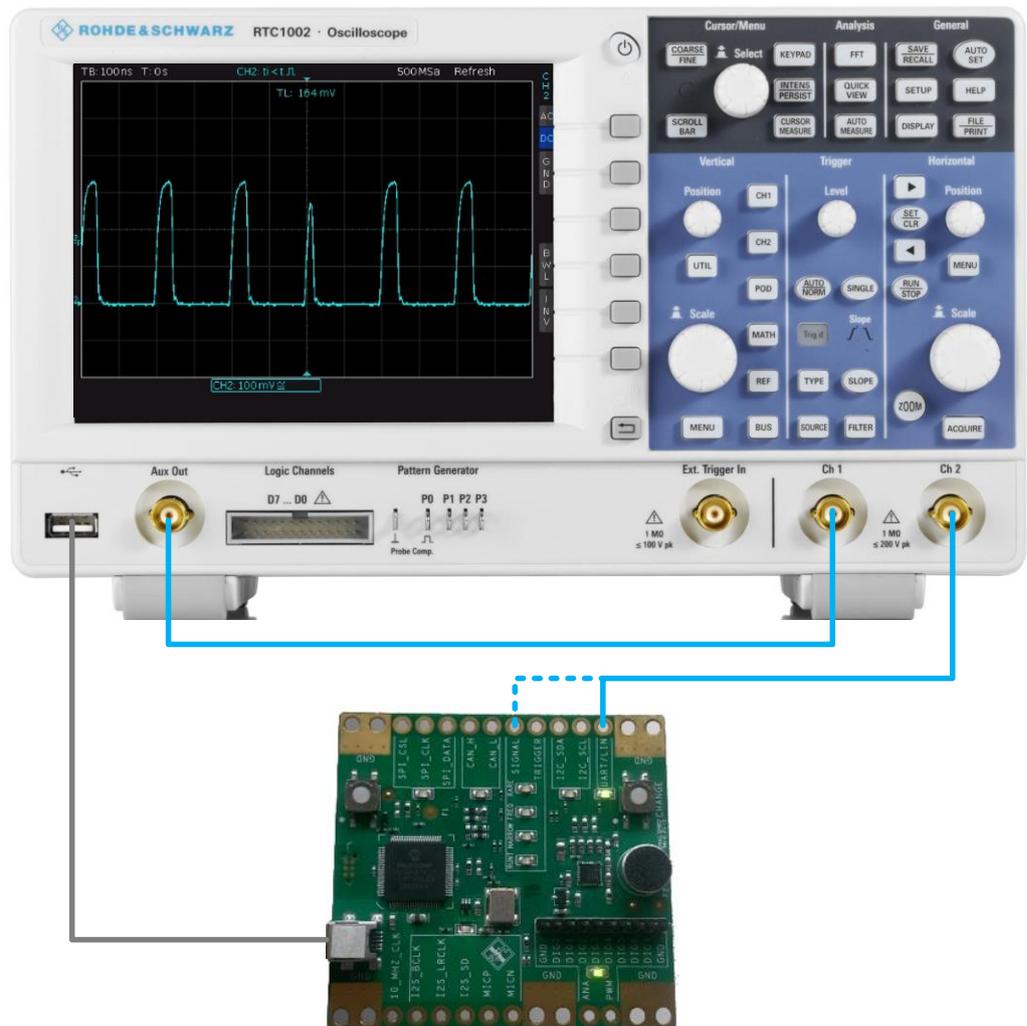


Abbildung 29: Messaufbau fortgeschrittene Trigger-Einstellungen

## 5.2 Versuchsdurchführung

- ▶ Versetzen Sie das Oszilloskop in den Grundzustand (*PRESET*). Vergessen Sie nicht die richtigen Tastverhältnisse einzustellen!

Sie haben den einfachsten und am häufigsten eingesetzten Trigger bereits in Kapitel 1.2.3 kennengelernt und in den darauffolgenden Messungen eingesetzt. Vor der Einführung anderer Triggertypen soll hier noch kurz auf die weiteren Einstellmöglichkeiten des Edge-Triggers eingegangen werden.

- ▶ Konfigurieren Sie den Signalgenerator so, dass folgendes Signal erzeugt wird:

FUNCTION	SINUS
FREQUENCY	1 kHz
AMPLITUDE	500 mV
OFFSET	400 mV

- ▶ Stellen Sie das Signal auf dem Bildschirm dar.

### Triggerfilter:

- ▶ Öffnen Sie mit dem Knopf *FILTER* das Einstellmenü des Edge-Triggers und wählen Sie die Option *AC*.

Sie sollten nun eine Darstellung wie in Abbildung 30 erhalten. In diesem Modus kann der Gleichspannungsanteil nach Belieben verändert werden, der Schwellwert des Triggers bleibt dank der AC-Filterung konstant und das Signal erscheint korrekt getriggert. Zusätzlich wird der Schwellwert im Auto-Modus selbstständig innerhalb des Signals begrenzt, wodurch das Signal stehend dargestellt wird, obwohl der Trigger-Level wie in Abbildung 30 eigentlich nicht richtig eingestellt erscheint. Im Normal-Modus kann der Triggerpegel über die Spitzenwerte des Signals hinaus verschoben werden.

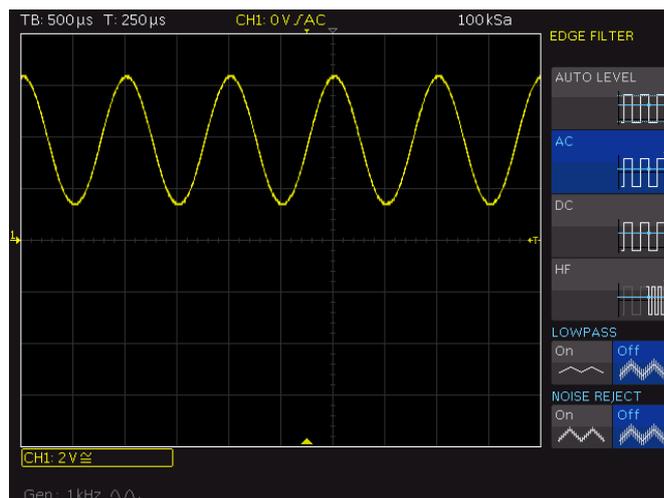


Abbildung 30: Triggerung mit AC-Filter

- ▶ Stellen Sie wieder die Option *AUTO LEVEL* ein.

Zusätzlich kann, wie in Abbildung 30 zu erkennen ist, noch ein Tiefpass zugeschaltet werden, der das Trigger-Signal mit einer oberen Grenzfrequenz von 5 kHz filtert. Das gemessene Signal wird auch hier nicht beeinflusst!

Bei starkem Rauschen kann passieren, dass der Flankentrigger Signalübergänge, die nur durch Störanteile entstanden sind, als die eigentlichen Signalfanken interpretiert. Um dies zu verhindern ist es möglich die Rauschunterdrückung zu aktivieren, welche einen 100 MHz Tiefpassfilter vor das Triggersignal schaltet.

#### Triggerung von Datenbursts:

► Deaktivieren Sie die Darstellung von Kanal 1 und versetzen Sie das Versuchsboard in den Zustand ① aus Tabelle 2 in Anhang A.1.

Das Board erzeugt nun ein UART-Signal mit 115,2 kBaud.

► Greifen Sie das Ausgangssignal am Ausgang *UART/LIN* mit dem an Kanal 2 angeschlossenen Tastkopf ab.

► Stellen Sie das Oszilloskop so ein, dass Sie die einzelnen Bitlängen eines Bursts des Bussignals gut erkennen können, siehe auch Abbildung 31.

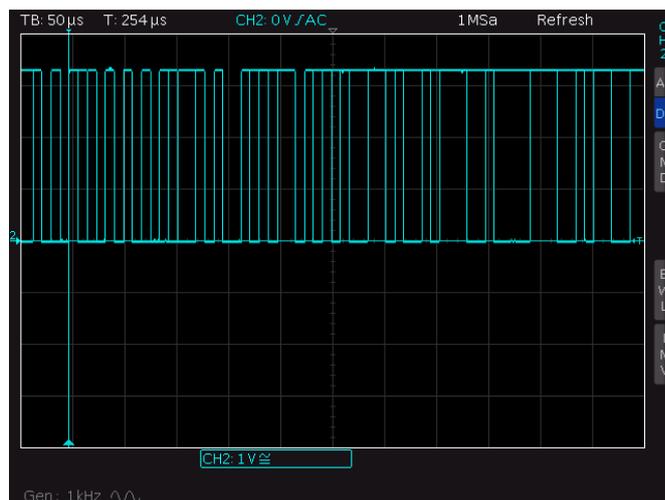


Abbildung 31: Darstellung eines Bussignals mit zufälligen Trigger-Punkten

Im obigen Screenshot sind die einzelnen Bitlängen zwar gut erkennbar, allerdings kann mit einer derartigen Darstellung die in der Übertragung enthaltene Information nicht entschlüsselt werden. Das liegt daran, dass das Oszilloskop auf zufällige Flanken innerhalb des Bursts triggert. Man könnte entweder durch Betätigung der Taste *SINGLE* in der *TRIGGER*-Gruppierung eine einzige Aufnahme auslösen und anschließend den Speicher des Oszilloskops zur Analyse nutzen oder eine Hold-Off-Zeit einstellen.

Durch die Hold-Off-Einstellung löst der Trigger erst nach einer festgelegten Zeit erneut aus. Dadurch triggert das Oszilloskop stets auf die erste fallende Flanke (des Startbits) des gesamten Bursts. Im Beispiel der Busübertragung sollte eine Zeit zwischen der Länge eines Bursts und dem Zeitraum zwischen zwei Bursts definiert werden.

► Stellen Sie die horizontale Skalierung derart ein, dass Sie die Länge eines Bursts und die Zeitspanne zwischen den Bursts abschätzen können.

Über die Taste *TYPE* kann neben der Triggerart auch die Hold-Off-Zeit eingestellt werden.

► Übernehmen als Hold-Off-Wert eine Zeit zwischen den beiden von Ihnen geschätzten Werten.

Die Busübertragung wird Ihnen nun richtig getriggert dargestellt und Sie können auch die Unterschiede zwischen einzelnen Bursts in Form wechselnder Bits erkennen. Die mit Hold-Off-Zeit aufgenommene Übertragung ist in Abbildung 32 dargestellt.

► Deaktivieren Sie wieder die Hold-Off-Zeit.

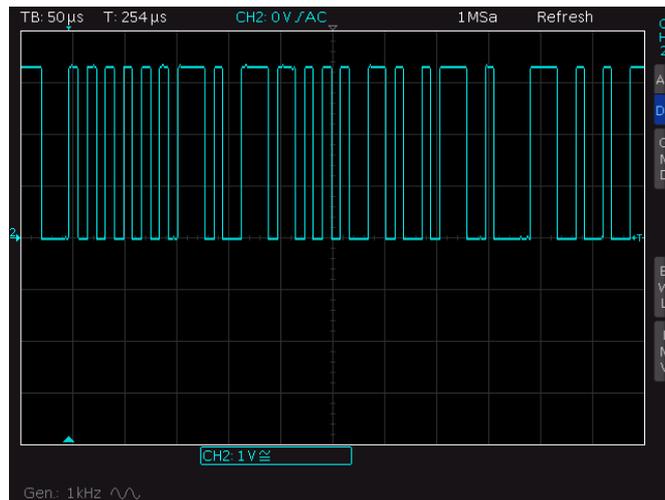


Abbildung 32: Darstellung eines Bussignals mit Hold-Off-Triggerung

### Pulstrigger:

Im Folgenden soll eine weitere Trigger-Form neben dem Flanken-Trigger eingeführt werden: der Puls-Trigger.

Dieser Trigger ist besonders für rechteckförmige Signale geeignet. Die vielen Möglichkeiten den Trigger zu konfigurieren erlauben es, gezielt auf bestimmte Bereiche innerhalb einer Übertragung zu triggern.

Das Versuchsboard kann neben verschiedenen Busstandards auch unterschiedliche Arten von Signalfehlern simulieren.

In komplexen digitalen Schaltungen können sogenannte Glitches auftreten. Glitches führen zu kurzzeitiger Falschaussage in logischen Schaltungen und zu einer temporäre Verfälschung einer booleschen Funktion. Sie entstehen weil die Signallaufzeiten in den einzelnen Gattern niemals vollkommen gleich sind oder auch durch Übersprechen. ► Schalten Sie das Board in den Zustand ⬇️ aus Tabelle 2 in Anhang A.1 und greifen Sie mit dem Tastkopf das Signal an dem Ausgang *SIGNAL* ab.

► Nutzen Sie den Flankentrigger um das Oszilloskop so einzustellen, dass einige Pulse dargestellt werden.

In diesen Einstellungen können Sie nicht den Glitch erkennen, obwohl dieser 100-mal pro Sekunde auftritt. Wenn Sie in einem Signal einen Glitch vermuten, empfiehlt es

sich, die Sample-Rate zu reduzieren um eine möglichst hohe Rate an Triggerereignissen zu erhalten. Durch diese Maßnahme verringert sich die Totzeit<sup>3</sup> zwischen den Messungen und die Wahrscheinlichkeit auch seltene Signalfehler aufzunehmen erhöht sich. Das RTC1000 bietet hierfür den schon in Kapitel 4.2 verwendeten *MAX. WFM. RATE*-Modus an.

► Wechseln Sie in diesen Modus, um eine maximale Signalwiederholrate zu erzielen.

Mit dem bloßen Auge sind die Signalfehler aufgrund der sehr kurzen Dauer auch mit dieser Einstellung nicht zu erkennen. Das RTC1000 bietet die Möglichkeit Signale eine definierbare Zeit lang nach dem Trigger-Ereignis noch auf dem Bildschirm anzuzeigen. Das heißt, die Anzeige wird nicht nach jedem Trigger mit der neuesten Aufnahme überschrieben, vielmehr ergibt sich ein träges Bild bestehend aus vielen Aufnahmen.

Dieser Modus nennt sich *PERSISTENCE* und kann über den Knopf  $\frac{INTENS}{PERSIST}$  aufgerufen werden.

► Stellen Sie dort unter *SETTINGS* folgendes ein:

MANUAL            INFINITE (Maximaler Wert)  
BACKGROUND    ON

Durch die Option Background bleiben gezeichnete Linien, in der obigen Einstellung für unbegrenzte Zeit, auf dem Bildschirm erhalten.

Um gemessene Glitches besser erkennen zu können, empfiehlt es sich durch Betätigung des Universaldrehknopfes *SELECT* die Intensität der Anzeige zu erhöhen.

► Stellen Sie am Oszilloskop ein:

INTENSITY        100 %

Mit diesen Einstellungen können Sie in unregelmäßigen Abständen auftauchende, kurze Pulse erkennen. In Abbildung 33 ist innerhalb jedes regulären Pulses ein aufgenommener Glitch erkennbar.

---

<sup>3</sup> Siehe Kapitel 1.2.2.



Abbildung 33: Pulsfolge mit einem Glitch

Damit ist die Form eines Glitches bekannt. Mit diesen Informationen kann der Puls-Trigger so konfiguriert werden, dass zuverlässig auf den Übertragungsfehler getriggert wird.

- ▶ Notieren Sie sich die Pulsbreite eines Glitches auf der Höhe der Triggerschwelle.
- ▶ Setzen Sie alle Einstellungen bezüglich der *PERSISTANCE* auf ihre Ausgangswerte zurück.
- ▶ Nehmen Sie am Trigger folgende Einstellungen vor:

TYPE	PULSE	
FILTER	POLARITY	POSITIVE
COMPARISON	ti < t	
TIME t	Breite des Glitches < t < Pulsbreite	

Der Trigger sucht nun einen Puls, dessen Dauer kürzer als die angegebene Zeitspanne ist. Da nur der gesuchte Glitch dieser Bedingung genügt, triggert das Oszilloskop, wie in Abbildung 34 dargestellt, zuverlässig auf die Störung.



Abbildung 34: Triggerung auf einen Glitch mittels des Puls-Triggers

Bei digitalen Signalen können neben Glitches auch sogenannte Runts auftreten. Dies sind normalgeformte Pulse, die allerdings nicht die geforderte Amplitude erreichen. Runts können dazu führen, dass eine logische 1 nicht als solche erkannt wird und dadurch eine Nachricht fehlerhaft verarbeitet wird.

Da die Signalfehler nur selten auftreten, sollte wieder auf eine maximale Update Rate geachtet werden.

- ▶ Schalten Sie das Board in den Zustand ⑥ aus Tabelle 2 in Anhang A.1.
- ▶ Gehen Sie genauso wie bei der Analyse des Glitches vor, um eine Vorstellung über die Beschaffenheit des vorliegenden Fehlers zu erhalten.

Nachdem Sie eine Vorstellung über die Form der fehlerhaften Pulse haben, muss der Trigger so eingestellt werden, dass das Oszilloskop zuverlässig auf die Runts triggert.

Einige Oszilloskope bieten für diesen Fall einen speziellen Runt-Trigger, den das RTC1000 allerdings nicht besitzt. Durch die Beschaffenheit der Runts kann mit dem Verfahren, welches für die Triggerung von Glitches verwendet wurde, hier nicht mehr gearbeitet werden. Runt-Trigger analysieren die Höhe eines Pulses um die richtige Entscheidung zu treffen.

Bei Verwendung des Puls-Triggers kann in diesem Fall folgendes ausgenutzt werden: Wurde die Trigger-Schwelle hoch genug gewählt, also über der maximalen Amplitude eines Runt-Pulses und unter der Amplitude der anderen Pulse, so tritt für ungewöhnlich lange Zeit kein Puls auf. Diese Zeit wertet das Triggersystem als Segment mit negativer Polarität.

- ▶ Schalten Sie die *PERSISTANCE*-Einstellungen wieder aus und konfigurieren Sie den Pulse-Trigger so, dass ein stehendes Bild ähnlich Abbildung 35 erzeugt wird.

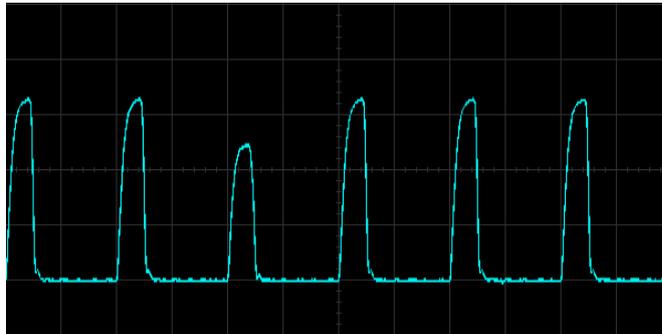


Abbildung 35: Triggerung eines Runt-Pulses

## 6 Signalanalyse mittels FFT

Auch wenn es anfangs ungewöhnlich erscheinen mag, bieten viele digitale Oszilloskope eine einfache Form der Spektrumsanalyse mittels Fast-Fourier-Transformation an. Dieses Kapitel gibt eine praktische Einführung in die Analyse von Signalen im Frequenzbereich mit Hilfe eines Oszilloskops.

### 6.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Oszilloskop und dem Versuchsboard aus Anhang A.1, das über die USB-Buchse mit Strom versorgt wird. Abbildung 36 stellt diesen Aufbau in seiner Gesamtheit dar. An Kanal 1 wird zunächst der integrierte Signalgenerator des Oszilloskops angeschlossen. Im weiteren Verlauf des Versuchs wird mit einem Tastkopf das Signal am `10_MHZ_CLK`-Ausgang gemessen. Ein Tastkopf an Kanal 2 ist mit dem `MICP`-Ausgang der Platine verbunden.

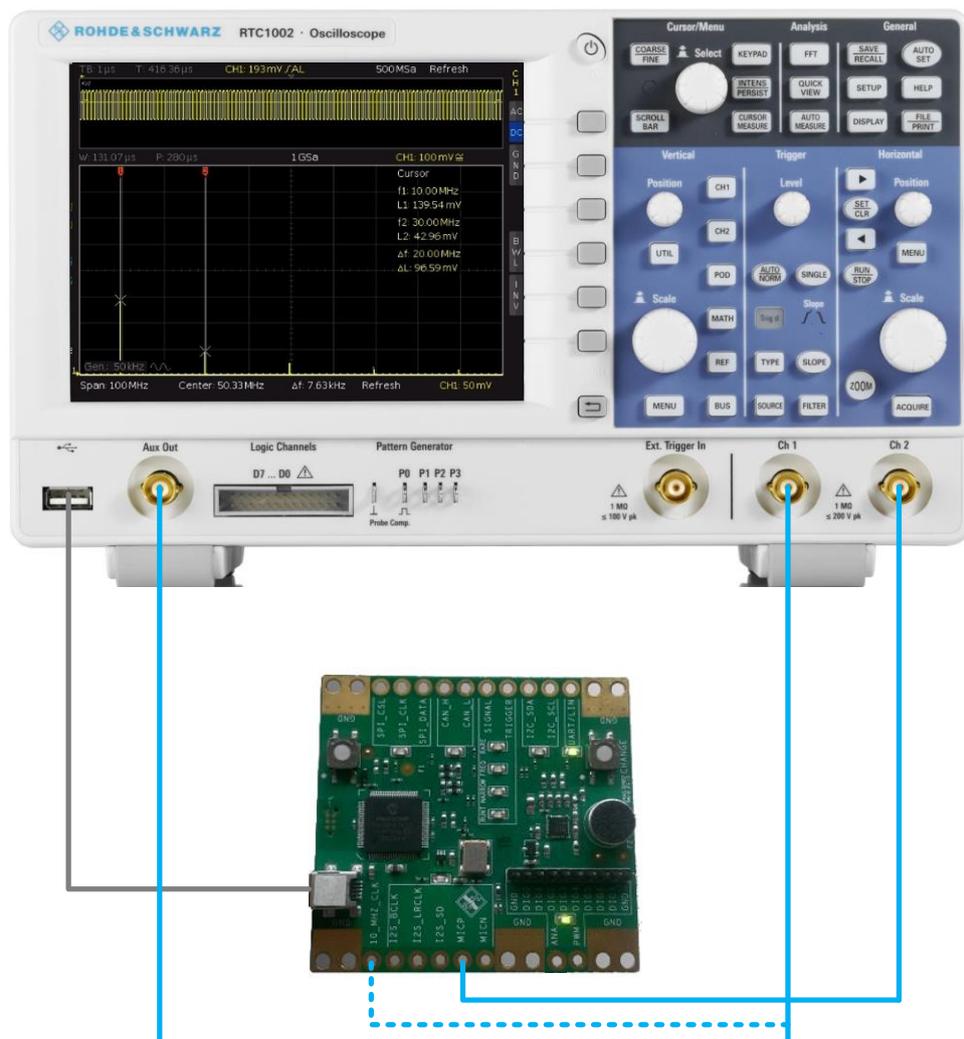


Abbildung 36: Messaufbau Signalanalyse mittels FFT

## 6.2 Versuchsdurchführung

► Versetzen Sie das Oszilloskop in den Grundzustand (*PRESET*). Vergessen Sie nicht die richtigen Tastverhältnisse einzustellen!

Vor Beginn des Versuchs sollte das Oszilloskop so konfiguriert werden, dass eine maximale Abtastrate erreicht wird.

► Aktivieren Sie den *MAX. SA. RATE*-Modus des Oszilloskops.

► Drücken Sie anschließend den *FFT*-Knopf unter der Gruppierung *ANALYZE*.

Der Bildschirm ist nun in zwei Abschnitte geteilt, siehe Abbildung 37. Im oberen Bereich (①) sind die bereits bekannte Spannungs-Zeitkurve des gemessenen Signals und die Einstellungen des horizontalen Systems zu sehen.

Zwischen den beiden Fenstern (②) befinden sich die Zoom- und Positionsangaben. Nur der Signalausschnitt, der im Fenster dargestellt ist und durch die beiden vertikalen, weißen Linien eingegrenzt ist wird für die FFT verwendet.

? *Wie sieht das Frequenzspektrum eines Sinus aus, dessen maximale Amplituden durch falsche Einstellung des vertikalen Systems weit über dem dargestellten Bereich liegen?*

Der untere Abschnitt (③) zeigt das Ergebnis der FFT-Analyse mit den dazugehörigen Einstellungen:

Über *Span* kann ausgelesen werden, wie groß der aktuell dargestellte Frequenzbereich ist. *Span*, Zeitbasis und gewählter Ausschnitt sind direkt miteinander gekoppelt. Je größer die Zeitbasis und der durch die vertikalen Linien dargestellte Bereich im Zeitbereich gewählt werden, desto kleiner kann die Frequenzspanne eingestellt werden.

*Center* gibt an, welcher Frequenz die Mitte des Bildschirmausschnittes entspricht.

Die minimale Schrittweite  $\Delta f$  kann indirekt über die Zahl an Punkten eingestellt werden.

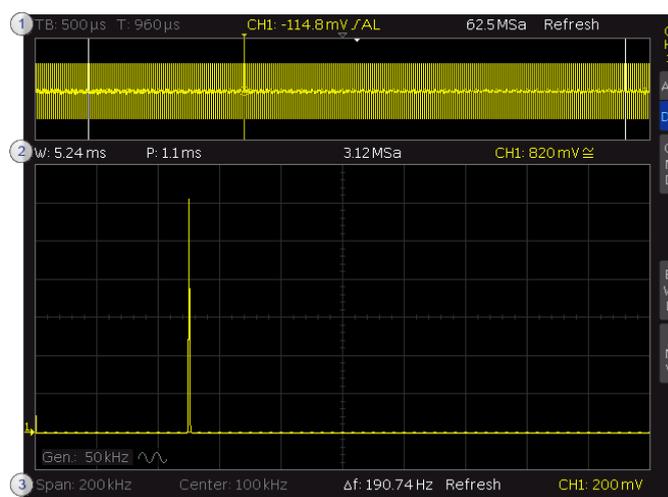


Abbildung 37: Aufbau des FFT-Modus

Zwischen den Fenstern kann durch Drücken des Drehknopfes *TIME/DIV* gewechselt werden. Der jeweils aktive Bereich (Zeitbereich, Auswahl des Signalausschnittes für die FFT oder Frequenzbereich) wird weiß umrandet. Somit kommen den Drehknöpfen je nach Bereich unterschiedliche Aufgaben zu:

MODUS \ KNOPF	<i>VOLTS/DIV + Offset</i>	<i>TIME/DIV + Offset</i>
<i>Zeitbereich</i>	Spannungsbereich (gesamt) des Signalausschnitts	Zeitbasis (s/Div) + Position
<i>Signalausschnitt</i>	Spannungsbereich (gesamt) des Signalausschnitts	Breite des Signalausschnitt für die FFT (ms)
<i>Frequenzbereich</i>	Skalierung der Spannung (V/Div) in der Spektraldarstellung	Frequenzspanne (Hz)

**Tabelle 1 Bedienelemente im FFT-Modus**

Zunächst wird ein Sinus als Ausgangssignal des Signalgenerators gemessen.

- ▶ Stellen Sie am Funktionsgenerator folgendes ein:

FUNCTION	Sinusoid
FREQUENCY	50 kHz
AMPLITUDE	350 mVpp

- ▶ Stellen Sie die Zeitbasis des Oszilloskops auf 500  $\mu$ s ein und wählen Sie einen maximalen Signalausschnitt für die FFT.
- ▶ Wählen Sie die minimale Frequenzspanne für diese Einstellungen aus und verifizieren Sie, dass das Spektrum des sinusförmigen Signals korrekt angezeigt wird.

Durch Drücken des *FFT*-Knopfes können Sie das entsprechende Menü wieder aufrufen.

- ▶ Stellen Sie das Ergebnis in dbV dar, siehe Abbildung 38.

Das RTC1000 bietet vier unterschiedliche Fensterfunktionen.

- ▶ Erklären Sie die Notwendigkeit der Fensterfunktionen und Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten. (Detaillierte Informationen dazu sind im RTC1000 Handbuch zu finden)
- ▶ Vergleichen Sie die Auswirkungen aller Fensterfunktionen im Spektrum!

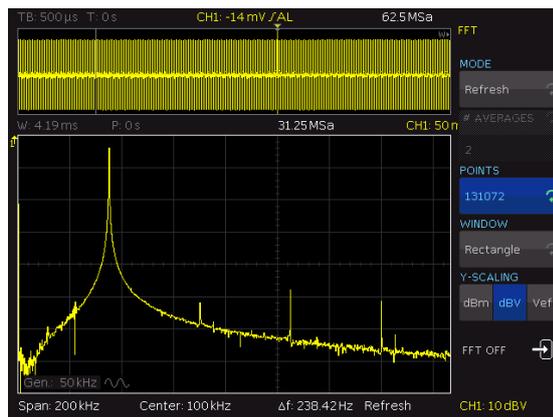


Abbildung 38: Messung eines Sinussignals mit dem Rechteckfenster

### Taktsignal:

Das Versuchsboard stellt in allen Betriebsmodi einen 10 MHz Takt bereit. Greifen Sie den Takt mit einem Tastkopf ab.

► Übernehmen Sie folgende Einstellungen:

TIME BASE	1 $\mu$ s
VOLT RANGE	500mV
SPAN	100 MHz
POINTS	131072

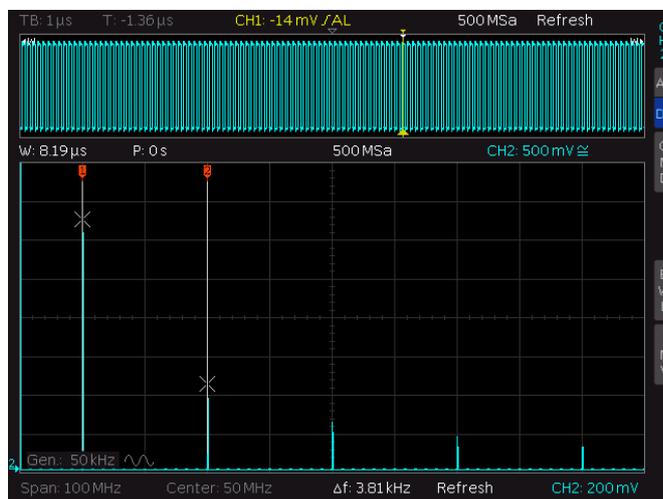


Abbildung 39: FFT-Analyse eines Rechtecksignals

Wie bei einem Rechtecksignal anzunehmen sind nur ungeradzahlige Vielfache der Grundfrequenz vorhanden.

? *Nach welcher Regel fallen die Amplituden bei einem Rechtecksignal ab?*

Wie Sie in Bild Abbildung 39 erkennen können, wird im FFT-Modus auch die Cursor-Messung unterstützt.

► Messen Sie die Amplituden der Oberschwingungen nach und verifizieren Sie ihre Vermutung.

Das Signal verfügt über einen Gleichspannungsanteil, den Sie durch geeignete Maßnahmen filtern könnten.

? *Wie wirkt sich der DC-Anteil auf die FFT aus?*

**MIC-Signal:**

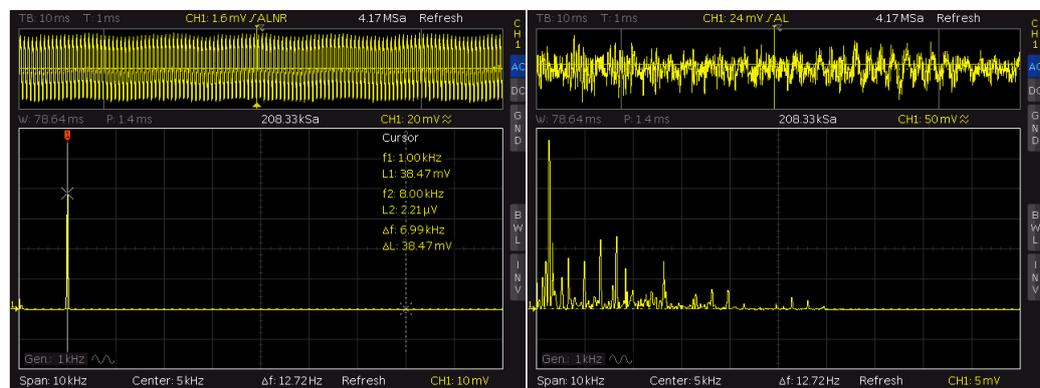
Das Versuchsboard ist mit einem Mikrofon ausgestattet. Mit Hilfe dieser Hardware können akustische Signale auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht und über die FFT-Funktion analysiert werden.

Das Ausgangssignal des Mikrofons ist differentiell. Dementsprechend sind zwei Ausgänge, *MICP* und *MICN*, verfügbar. Im nächsten Kapitel werden Sie lernen diese Signale differentiell mit dem Oszilloskop zu messen. Für diesen Versuch genügt es das *MICP*-Signal abzugreifen.

► Versetzen Sie das Versuchsboard in den Zustand ③ aus Tabelle 2 im Anhang A.1.

Abbildung 40 zeigt links die Messung eines mit einem Smartphone erzeugten 1 kHz Sinus. Der Screenshot in der rechten Hälfte der Abbildung wurde während dem Abspielen einer .mp3 Datei aufgenommen. Bei diesem Bild ist gut die Dämpfung der höheren Frequenzen durch das Format erkennbar.

Wenn die Quelle direkt auf dem Mikrofon liegt, kann die Lautstärke recht niedrig gewählt werden.



**Abbildung 40: Messung verschiedener Signale mit dem Mikrofon des Versuchsboards**

Die optimalen Einstellungen sind von der Signalquelle abhängig, für die Messungen aus Abbildung 40 wurde folgende Konfiguration verwendet:

TIME BASE	10 ms
WINDOW WIDTH	78,64 ms
SPAN	50 kHz
CENTER	5 kHz

► Erzeugen Sie mit einem geeigneten Gerät (beispielsweise Smartphone) verschiedene Signale und analysieren Sie diese mit der FFT-Funktion des Oszilloskops.

## 7 Analyse von protokollbasierten Bussignalen

Signalbusse tragen in elektronischen Systemen eine wichtige Rolle: Die Sicherstellung der fehlerfreien und schnellen Kommunikation aller im System beteiligten Bausteine. Moderne Oszilloskope sind in der Lage die Bussignale zu dekodieren und damit perfekt geeignet die wichtige Aufgabe der Überprüfung aller Busfunktionen zu übernehmen. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in verschiedene Bussysteme und Analysemethoden mit dem Oszilloskop.

ACHTUNG: Für einen Teil des Versuchs ist die Option RTC-K3 notwendig!

### 7.1 Messaufbau

Für den Messaufbau wird das Versuchsboard aus Anhang A.1 an beide Kanäle angeschlossen und über die USB-Buchse mit Strom versorgt. Abbildung 41 stellt diesen Aufbau in seiner Gesamtheit dar. Der an Kanal 1 angeschlossene Tastkopf ist zunächst mit dem *UART/LIN*-Ausgang der Platine und im späteren Verlauf des Versuchs mit dem Ausgang *CAN\_H* verbunden. An Kanal 2 liegt das Signal von dem Ausgang *CAN\_L* an.

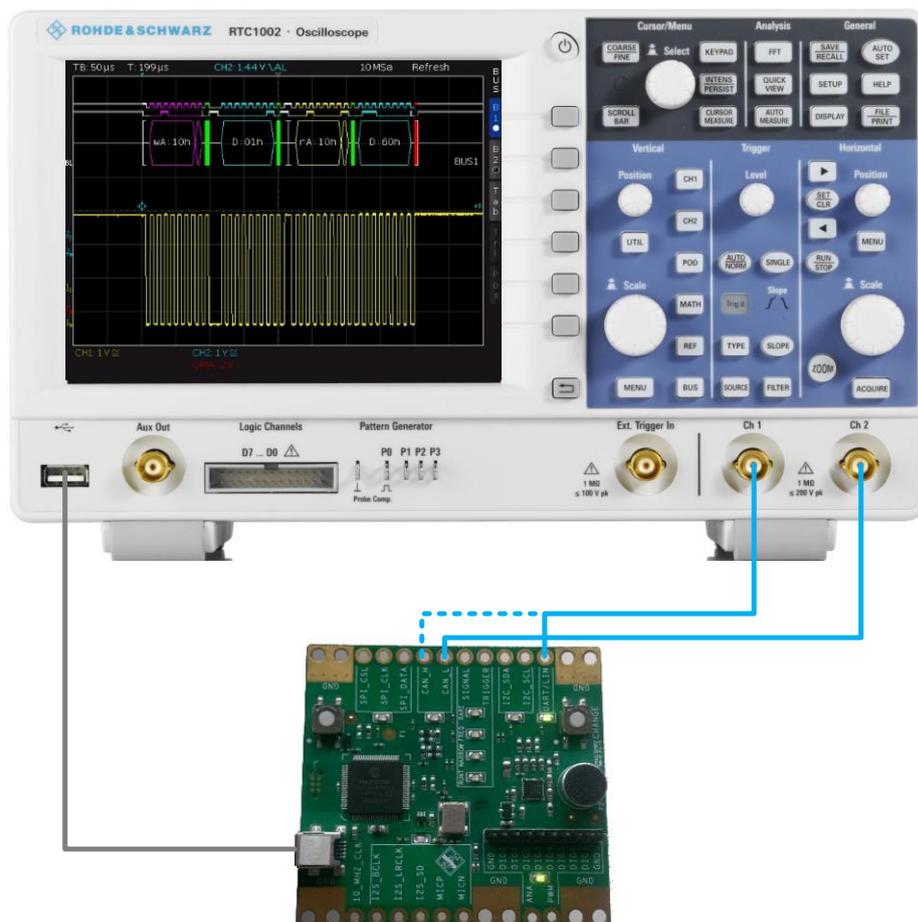


Abbildung 41: Messaufbau Analyse von Bussignalen

## 7.2 Versuchsdurchführung

► Versetzen Sie das Oszilloskop in den Grundzustand (*PRESET*). Vergessen Sie nicht die richtigen Tastverhältnisse einzustellen!

### UART-Bus:

Als Beispiel für eine einfache Busübertragung soll das bereits aus Kapitel 5.2 bekannte UART-Signal noch einmal genauer untersucht werden. Für die Übertragung wurden folgende Kenndaten angegeben:

THRESHOLD	1.65V
BIT RATE	115.2Kbps
STOP BITS	1
DATA BITS	8
PARITY	None
BIT ORDER	LSB First
POLARITY	Idle High

? Was legt der Wert *THRESHOLD* fest?

- Schalten Sie das Versuchsboard in den Zustand ① aus Tabelle 2 in Anhang A.1.
- Erzeugen Sie wie in Kapitel 5.2 mit Hilfe eines Puls-Triggers eine stabile Darstellung des Signals von Kanal 1.
- Überprüfen Sie durch eine Markermessung die Bitrate.

In Abbildung 42 ist ein Datenbyte innerhalb einer UART-Übertragung markiert. Beachten Sie, dass die Übertragung mit dem niederwertigsten Bit (LSB) beginnt und mit dem höchstwertigsten (MSB) endet. Vor jedem Byte ist ein Startbit (logisch 0) und nach jedem übertragenen Byte ist ein Stopbit (logisch 1) eingefügt. Die zu sendenden Bytes werden unter Beachtung dieser Regeln aneinander gereiht übertragen. Die so entstandenen Bytefolgen werden zu Paketen zusammengefasst. Einzelne Pakete sind durch Leerlaufzeiten (*Idle*) getrennt. Durch die Einstellung *Idle High* nimmt der Bus in dieser Zeit den logischen Wert 1 an.

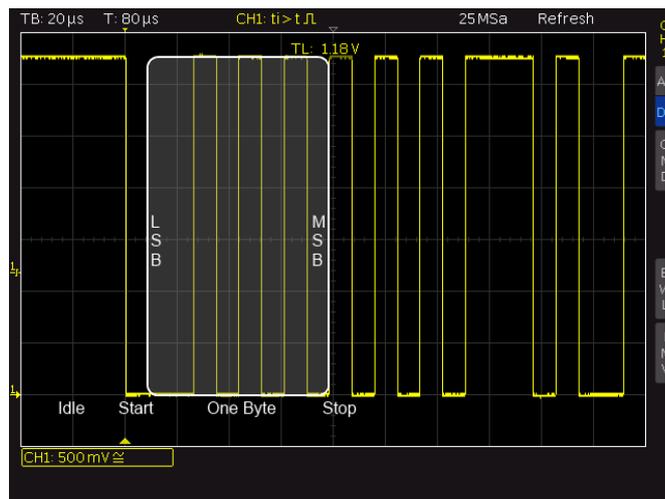


Abbildung 42: Aufbau eines Datenbytes innerhalb einer UART-Übertragung

Das markierte Byte in Abbildung 42 überträgt folglich den Wert: `0101 0100`.

Ein gesamtes Paket besteht in diesem Beispiel aus einem 12 Byte langen ASCII-String.

► Lesen Sie die ersten 4 Byte des Strings als ASCII-Zeichen aus.

Wahrscheinlich können Sie sich jetzt auch erklären, warum einige der mittleren Bit der Übertragung fortlaufend wechseln. Sie werden bald die gesamte Nachricht mit Hilfe der Automatik des RTC1000 dekodieren.

Vor der Messung anderer Bussysteme soll noch kurz auf eine Besonderheit von UART-Übertragungen eingegangen werden:

Eine UART-Übertragung wird asynchron gestartet. Das heißt, der Sender kann jederzeit mit der Übermittlung der Daten beginnen. Außerdem wird kein Taktsignal benötigt, da für die kurzen Pakete innerhalb der Übertragung die Genauigkeit des auf den Rahmen synchronisierten lokalen Oszillators ausreichend ist.

Zu den meist verbreiteten UART-Bussen zählt beispielsweise die RS232-Schnittstelle. Während der manuellen Analyse der UART-Übertragung ist Ihnen sicherlich aufgefallen, wie zeitraubend und fehleranfällig die händische Auswertung einer Busübertragung sein kann. Das RTC1000 bietet für verschiedene Busse automatisierte Analyseprogramme an. Zuerst soll mit Hilfe des Oszilloskops der komplette Inhalt der UART-Übertragung dekodiert werden.

► Schalten Sie das Versuchsboard in den Zustand ① aus Tabelle 2 in Anhang A.1.

Über den Knopf *BUS* unter der Gruppierung *VERTICAL* kann die Busanalyse aktiviert werden.

► Versetzen Sie das Oszilloskop in den *BUS*-Modus und rufen Sie die Einstellungen durch die Taste *MENU* auf.

► Wählen Sie *UART* als *BUS TYPE* aus und stellen Sie unter *CONFIGURATION* die am Anfang des Kapitels dargestellten Parameter ein.

Um eine Darstellung wie in [Abbildung 43](#) zu erhalten, muss die vertikale Skalierung angepasst und die Daten als ASCII-Zeichen dekodiert werden.

- ▶ Stellen Sie die Skalierung auf 500 mV/DIV ein und übernehmen Sie unter *DISPLAY SETUP* die Einstellung *ASCII* damit die Übertragung im Klartext angezeigt wird.

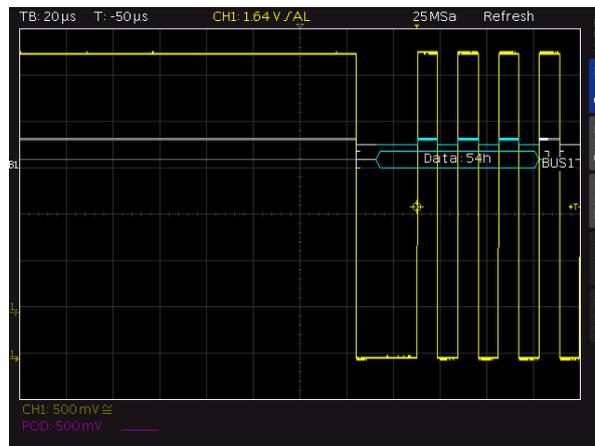


Abbildung 43: Automatisierte Analyse einer UART-Übertragung

### CAN-Bus Dekodierung und Triggerung:

Der CAN-Busstandard wurde hauptsächlich für die Verwendung im automotive Bereich entwickelt. Für dieses Anwendungsgebiet ist die Störsicherheit von größter Bedeutung. Deshalb kommen Systeme wie die bereits vorgestellte RS232-Schnittstelle hier nicht in Frage.

Im CAN-Bus werden differentielle Signale benutzt um eine Unterdrückung von Gleichtaktstörungen zu erreichen. Auch wenn die passiven Tastköpfe nur für Messungen relativ zum Massepotential ausgelegt sind, können differentielle Signale mit diesen gemessen werden. Im Grunde wird beim Empfang differentieller Signale der negative von dem positiven Anteil subtrahiert. Diese Aufgabe kann in dem in Abbildung 41 dargestellten Messaufbau das Oszilloskop übernehmen.

- ▶ Versetzen Sie das Versuchsboard in den Zustand ⑧ aus Tabelle 2 in Anhang A.1.
- ▶ Messen Sie mit Kanal 1 das Signal CAN\_H und mit Kanal 2 CAN\_L. Stellen Sie beide Signalanteile über die Länge eines Paketes übereinander auf dem Oszilloskop dar.



Abbildung 44: Messung differentieller Signale

► Rufen Sie durch Drücken der Taste *MATH* unter der Gruppierung *VERTICAL* auf dem Bildschirmrand das zugehörige Menü auf und wählen sie *SUB* statt *ADD*.

Mit diesen Einstellungen wird das mit Kanal 2 gemessene Signal von Kanal 1 abgezogen und die eigentliche Bitfolge wird als rotes Signal dargestellt, siehe Abbildung 44.

? *Welcher weitere Vorteil differentieller Übertragungen ist in Abbildung 44 ersichtlich?*

► Berechnen Sie die Bitrate der Übertragung.

Auch CAN-Bussignale kommen ohne separates Taktsignal aus. Es sind gleichzeitig mehrere Teilnehmer gleichzeitig an den Bus angeschlossen. Durch eine Wired-And-Schaltung können diese Kollisionen erkennen und entsprechend reagieren.

Abschließend können Sie das bereits untersuchte CAN-Bus Signal ähnlich der UART-Übertragung mit Hilfe des RTC1000 analysieren.

► Richten Sie eine automatisierte CAN-Bus Messung für das vorliegende Signal am Oszilloskop ein. Benutzen Sie für die Konfiguration die von Ihnen berechnete Bitrate.

Mit den aktuellen Triggereinstellungen kann das CAN-Signal nicht stehend dargestellt werden. Durch Verwendung der automatisierten Busmessungen haben Sie einen neuen Triggertypen freigeschaltet:

► Wählen Sie unter *TYPE* die Option *SERIAL BUS* aus.

Mit der Taste *FILTER* können Sie verschiedene Triggerbedingungen einstellen.

► Wählen Sie zunächst *START OF FRAME*.

Sie können auf dem Bildschirm des Oszilloskops nun die verschiedenen Segmente einer CAN-Übertragung erkennen, siehe Abbildung 45.

Anhand von Abbildung 45 soll hier kurz der Aufbau eines CAN-Frames beschrieben werden.

Ein einzelnes dominantes Bit zeigt den Beginn eines Frames an.

Anschließend folgt der sogenannte Identifier (dID), der den Inhalt der Nachricht anzeigt. Dementsprechend gibt der Identifier nicht das Ziel an, die Empfänger entscheiden vielmehr ob die Nachricht für sie relevant ist.

Auf den Identifier folgt das Control Field, welches die Anzahl an Bytes in dem aktuellen Frame angibt. In dem abgebildeten Fall erwartet der Empfänger also 2 Byte an Daten, welche durch das Oszilloskop als Data gekennzeichnet wurden.

Abschließend wird zur Fehlererkennung ein CRC-Code übertragen. (6)

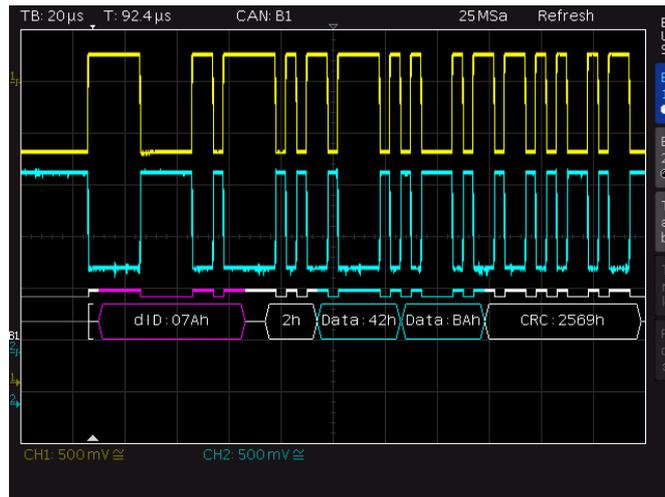


Abbildung 45: Automatisierte Analyse einer CAN-Busübertragung

Bei der Analyse einer Busübertragung sind insbesondere fehlerhaft übertragene Datenpakete von Interesse. Die händische Auswertung aller erfassten Übertragungen ist in diesem Fall nicht praktikabel. Das RTC1000 bietet hierfür spezielle Triggereinstellungen an, um verschiedene Fehlerarten zuverlässig und schnell zu erkennen.

- ▶ Stellen Sie das Oszilloskop bezüglich Trigger- und Aufnahmemodus optimal ein, um selten auftretende Ereignisse mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit zu erkennen.
- ▶ Wählen Sie unter *FILTER* für den aktuellen Triggertyp folgende Einstellung

*ERROR*                      *CRC*

Wenn Sie die horizontale Triggerposition ein wenig verschieben, erhalten Sie eine Darstellung wie in Abbildung 46. Das Oszilloskop erkennt mit diesen Einstellungen zuverlässig die alle 3 Sekunden auftretende, fehlerhafte CRC-Folge.

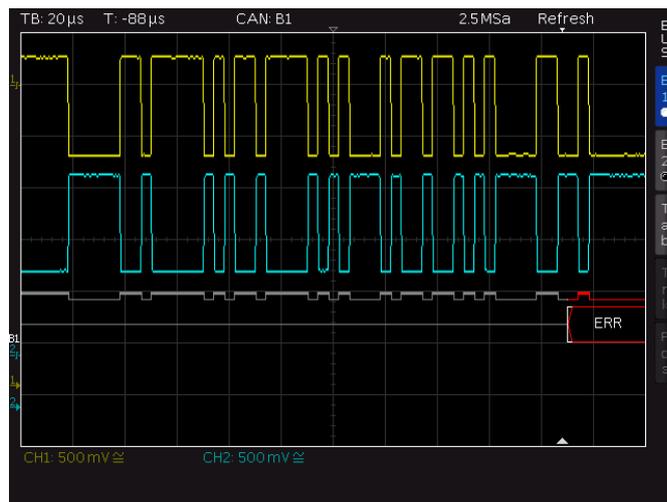


Abbildung 46: Triggerung auf einen CRC-Error

## 8 Übung zu FMCW-Radaren

Obwohl Oszilloskope zum Messen der Spannung in Abhängigkeit von der Zeit verwendet werden, können viele digitale Oszilloskope als Analog/Digital-Wandler (A/D-Wandler) eingesetzt werden. Somit bieten Sie die Möglichkeit, Signale nachzubearbeiten, beispielsweise an einem externen PC, der über LAN verbunden ist. In dieser Übung werden binäre Abtastwerte an den PC, auf dem MATLAB® läuft, gestreamt und dort analysiert. Dieses Kapitel beinhaltet eine praktische Einführung in die Welt der Radare in Form einer FMCW-Radarapplikation für Entfernungsmessungen. Entfernung ist bei Radarapplikationen der Begriff für Distanz. Dieser Versuchsaufbau umfasst HW und ein MATLAB®-Skript, mit dem das Oszilloskop ferngesteuert wird.

Die in dieser Übung benötigten HF-Komponenten sind in Anhang A.4 aufgeführt. Der Aufbau der HF-Komponenten wird in Anhang A.3 beschrieben.

### 8.1 Versuchsaufbau

Der Messaufbau des Versuchs besteht aus einem Oszilloskop und den HF-Komponenten (siehe Anhang A.2)

Eine Gleichspannungsversorgung liefert 5 V (bis zu 150 mA) für die HF-Komponenten. Die Antennen sind in der Stückliste (ST) enthalten, siehe Anhang A4.

Das hier verwendete Oszilloskop verfügt über einen integrierten Signalgenerator, der an den Eingang Channel 3 angeschlossen und, über ein BNC-T-Stück abgezweigt, weiter an den VCO-Abstimm-Pin geführt ist. Der ZF-Pfad der HF-Komponenten wird dann mit einem BNC-Kabel an den Eingangsstecker Channel 1 des Oszilloskops angeschlossen.

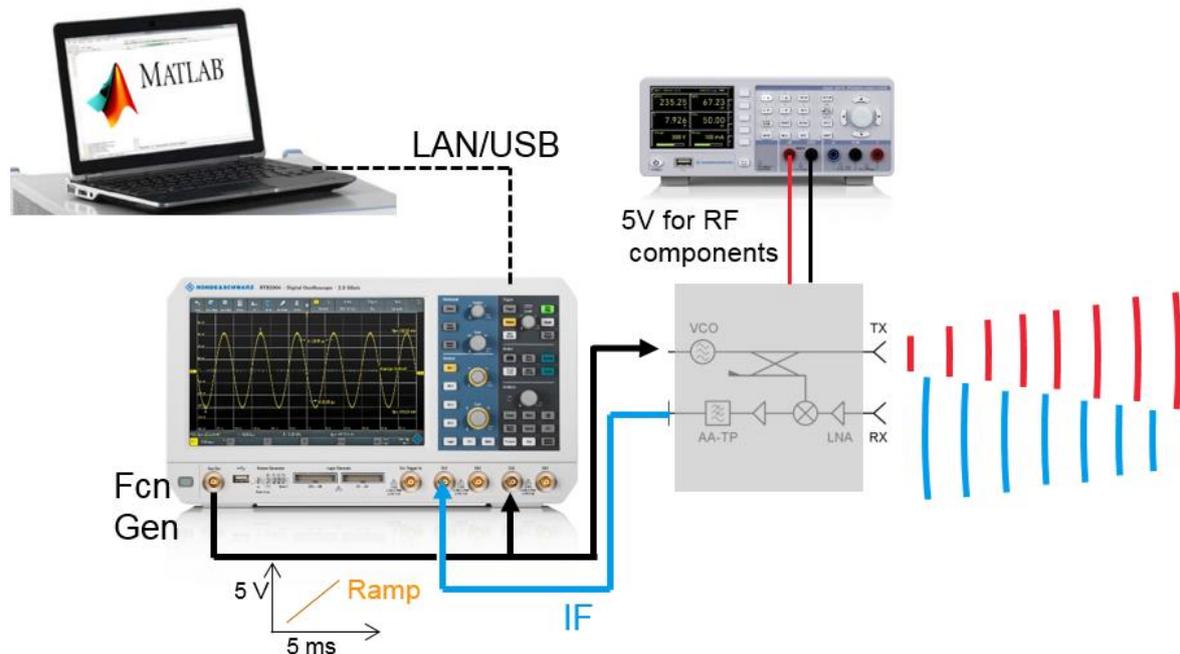


Bild 8-1: Messaufbau zur FMCW-Radarerzeugung

Die HF-Komponenten werden mit einer Gleichspannungsquelle von +5,0 V gegenüber Masse versorgt. Führen Sie die Verkabelung bitte entsprechend durch. Weitere Details finden Sie in Anhang A.3.

Befestigen Sie die beiden Antennen an einem Prüfadapter.

## 8.2 Versuchsdurchführung

- ▶ Versetzen Sie das Oszilloskop in den Grundzustand (PRESET). Vergessen Sie nicht, die richtigen Tastverhältnisse einzustellen! Das Oszilloskop so einstellen, dass mindestens ein Zyklus dargestellt wird ( $3 \times 5 \text{ ms}$  der Rampe  $\geq 15 \text{ ms}$ ).
- ▶ Verbinden Sie das RTB2000 über ein LAN-Kabel mit dem Steuer-PC (oder über einen Hub). Verifizieren Sie die IP-Adresse unter [Symbol] am RTB2000. Geben Sie im MATLAB®-Code diese IP-Adresse ein.
- ▶ Stellen Sie den Generator des Oszilloskops so ein, dass er ein Signal mit einer Anstiegsrampe zwischen 0-5 V innerhalb 5 ms generiert. Verifizieren Sie den Rampenbetrieb in Channel 3.

Konfigurieren Sie den Signalgenerator so, dass das folgende Signal generiert wird:

FUNCTION	Ramp (Polarity up)
FREQUENCY	200 Hz
AMPLITUDE	2.5 Vpp
OFFSET	1.25 V

(Einschalten)

- ▶ Stellen Sie das Signal auf dem Bildschirm dar.
- ▶ Stellen Sie Channel 1 (ZF-Signal) so ein, dass er auf CH3 bei  $> 0$  V triggert, um ein stabiles Signal zu erhalten.
- ▶ Stellen Sie die Werte [Acquire] am Oszilloskop folgendermaßen ein
 

RECORD LENGTH	20 MSa (Maximum) setzt die Abtastrate auf 305 kSa/s
ACQUIRE MODE	High Resolution
NX SINGLE	1
INTERPOLATION	Sin(x)/x
- ▶ Stellen Sie die horizontale Skalierung auf CH1 (ZF-Signal) so ein, dass nichts abgeschnitten wird

Das Signal sollte jetzt folgendermaßen aussehen:



### 8.3 Gleichungen im MATLAB®-Code

Der MATLAB®-Code besteht aus mehreren Funktionen, die in den Kommentaren erläutert werden.

Der MATLAB®-Code verarbeitet die Zeitsignale von CH1 (ZF-Signal) und CH3 (Rampensignal), die vom RTB2000 über dessen LAN-Verbindung übertragen werden.

Das ZF-Signal (CH1) wird einer FFT unterzogen, um die Leistung gegenüber der Auswertefrequenz anzuzeigen. Dies wird gemäß folgender Formel als Entfernung in [m] umgewandelt:

$$\frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{2 \times \text{Bandbreiten} - \text{Chirp}} = \frac{c \text{ [m/s]}}{2 * bw[\text{Hz}]} = \frac{2,98 \text{ m/s}}{2 * 343 \text{ MHz}}$$

$$= 0,45 \text{ m pro FFT} - \text{Bin}$$

Dieser Wert wird auch als „Entfernungsaufösung“ bezeichnet. Das bedeutet, dass zwei Objekte mit 30 cm Abstand nicht unterschieden werden können.

Die Schwebungsfrequenz (die Differenz zwischen dem empfangenen Echo-Signal und dem Sendesignal) definiert die Reflexion des Zielobjekts bei einer bestimmten Entfernung gemäß folgender Formel:

$$f_B = \frac{2 \times \text{Bandbreiten} - \text{Chirp}}{\text{Lichtgeschwindigkeit} \times \text{Zeit}_{\text{Chirp}}} * \text{Entfernung [m]}$$

$$= \frac{2 \times BW}{c \times T_{\text{Chirp}}} * R$$

Beispielsweise würde ein reflektierendes Objekt bei 10 m mit bekannter Chirp-Bandbreite eine Schwebungsfrequenz  $f_B$  bei 2,23 kHz erzeugen:

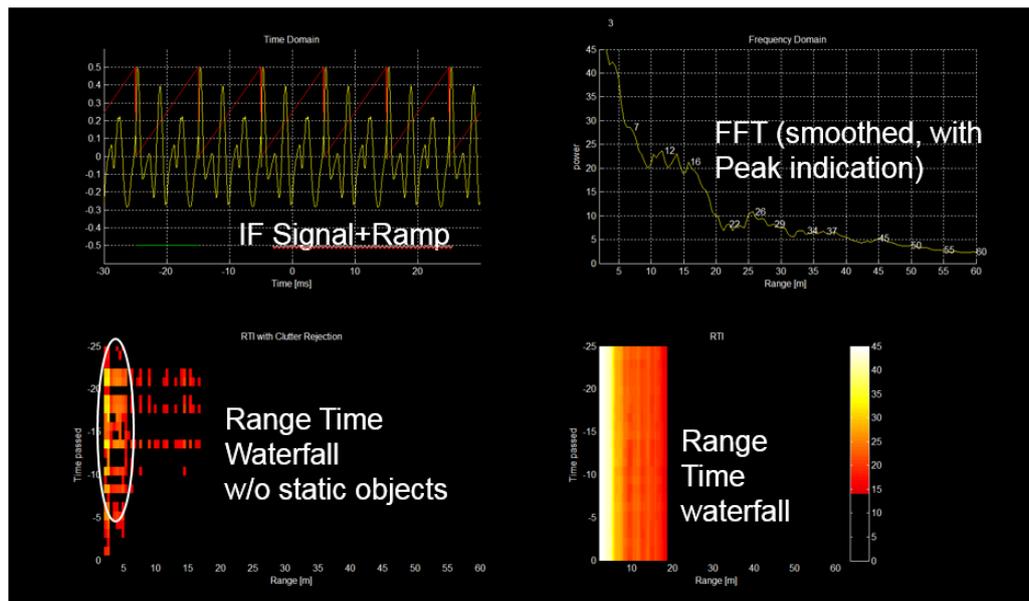
$$f_B = \frac{2 \times 343 \text{ } 10^6 \text{ Hz}}{2,98 \times 10^9 \text{ m/s} * 0,1 \text{ s}} * 10 \text{ m} = 2,23 \text{ kHz}$$

Beachten Sie bitte, dass sich die hier verwendete Bandbreite auf den speziellen VCO bezieht, der im Anhang beschrieben wird.

Das Generatorsignal (CH3) wird genutzt, um das FFT-Zeitfenster zu synchronisieren, da der RTB2000 nicht über eine zeitbeschränkte Trigger-Funktionalität verfügt.

Die folgenden Ausgaben werden in MATLAB® geplottet und in 4 Fenstern erläutert:

- Links oben „Zeitbereich“ (Time Domain): erfasste Zeitsignale von CH1- und CH3
- Rechts oben „Frequenzbereich“ (Frequency Domain): FFT von CH1 (ZF) (gefenstert mit grünem Balken in Anzeige links oben)
- Rechts unten „RTI“: „Wasserfallspektrum“ (RTI: waterfall ) mit History. Änderungen der Spitzenwerte können identifiziert werden.
- Links unten „RTI mit Festzielunterdrückung“: (RTI with Clutter rejection) Statische Objekte werden nicht dargestellt, sondern nur sich bewegende Objekte.



- ▶ Ändern Sie die Rampenspitze auf 0-2,5 V. Die Rampe bestimmt die VCO-Frequenz.  
 Wie beeinflusst die Änderung der DC-Rampe die Bandbreite des Chirpsignals?  
 ?  
 Welcher Wert ergibt sich für die Entfernungsauflösung?
  
- ▶ Ändern Sie die Rampendauer des Generators von 5 ms auf 10 ms.  
 ? Wie wirkt sich die Zykluszeit auf das FFT-Diagramm aus?
  
- ▶ Lassen Sie einen Studenten auf das Radar zugehen.  
 ? Wie wirkt sich dies auf das Diagramm „RTI mit Festzielunterdrückung“ (RTI with clutter rejection diagram) aus?

## 9 Literatur

- [1] 1. **Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.** *R&S@RTO Digital Oscilloscope - User Manual.* [Manual] München : s.n., 2015.
- [2] 2. —. *Oscilloscope Fundamentals - Primer.* Columbia : s.n.
- [3] 3. **Johnson, Dr. Howard W. und Graham, Dr. Martin.** *High-speed Digital Design – A Handbook of Black Magic.* s.l. : Pearson Education, 1993.
- [4] 4. **Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG.** *The Impact of Digital Oscilloscope Blind Time on Your Measurements.* München : Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2011.
- [5] 5. —. Benefits of the R&S@RTO Oscilloscope's Digital Trigger. 2012.
- [6] 6. **Robert Bosch GmbH.** *CAN Specification Version 2.0.* Stuttgart : s.n., 1991.

# Anhang

## A.1 Anhang 1 Das Versuchsboard

In Abbildung 47 ist das Versuchsboard aus den Kapiteln 3.2, 5.2, 6.2 und 7.2 dargestellt. Die in den genannten Kapiteln verwendeten Teile sind mit einem roten Viereck eingerahmt und die benutzten Ausgänge (bzw. der Mikrofoneingang) mit dem jeweiligen Versuchskürzel gekennzeichnet. Für den Erwerb des Versuchsboards (Bezeichnung: Demo Board Time Domain Measurements, Serviceteilenummer PW0002.9763.00), wenden Sie sich bitte an die örtliche Rohde & Schwarz Vertretung oder an ein Rohde & Schwarz Servicecenter.

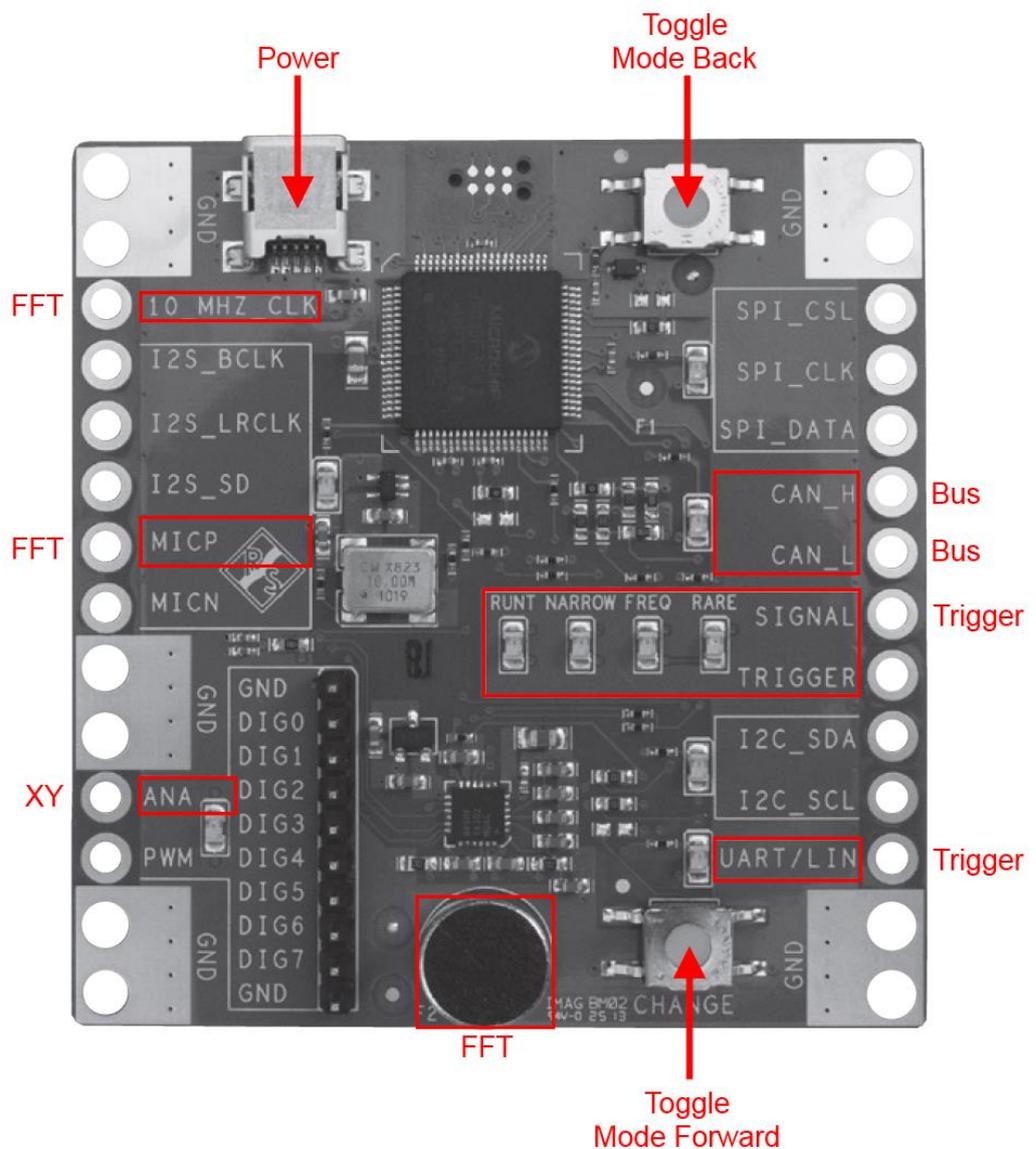
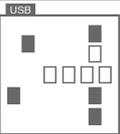
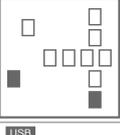
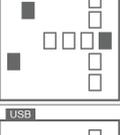
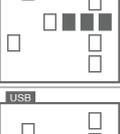
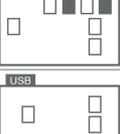
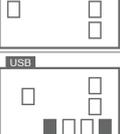
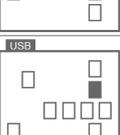
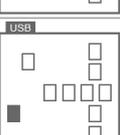
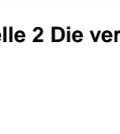


Abbildung 47 Das Versuchsboard

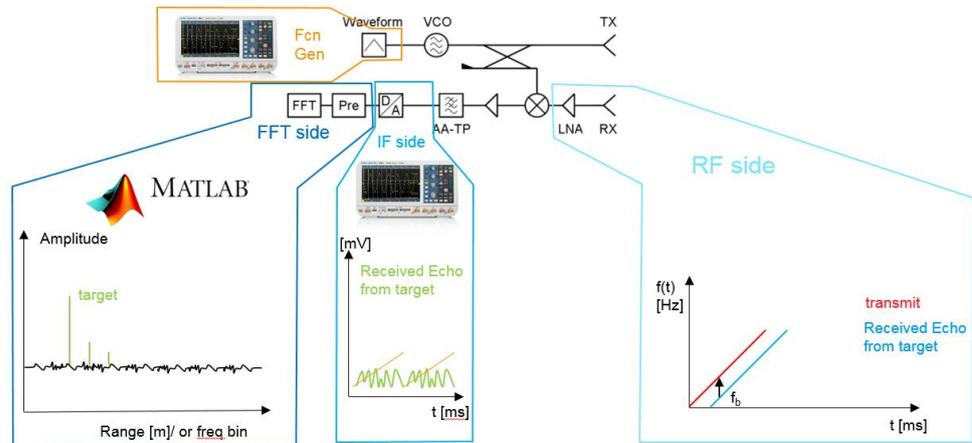
In Tabelle 2 sind die verschiedenen Modi des Boards dargestellt. Durch die beiden Taster kann zwischen diesen hin und her geschaltet werden. Die LEDs zeigen den jeweiligen Betriebszustand an.

**Signal Configuration Modes**

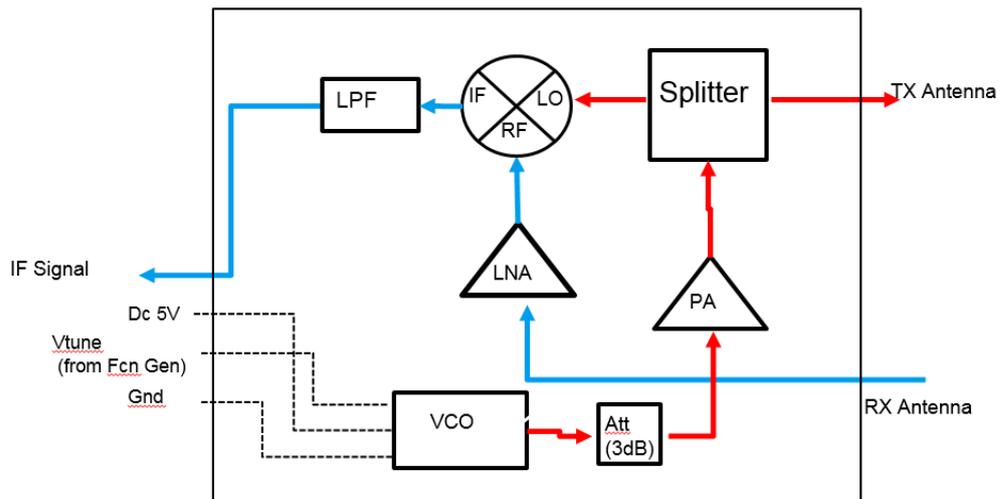
Mode / LED Config	Audio Block	Digital Logic/ PWM/ ANA	UART/ LIN Signal	I2C Bus	SPI Signals	Rare Events Block	CAN Bus
1 	Shows AGC turned on thus the result is amplified	Distorted Sine Wave	115.2kbaud UART Signal	Continuous Readback of ACG (Auto Gain Control)	ASCII Freq. Switch Synthesis		
2 		Sine Wave	19.2kbaud LIN Frame with Checksum Errors				
3 	Normal Mic Signal	Sawtooth Digital Counting Pattern		Setup of Audio Chip Without AGC		Pulse With No Error	
4 						Pulse With Narrow Glitch 100/s	
5 						Pulse With Narrow Glitch 1/s	
6 						Pulse With Runt 100/s	
7 						Pulse With Runt 1/s	
8 							250kbps CAN Frame With CRC Error
9 		Simulated Power Supply Ripple (mV)					

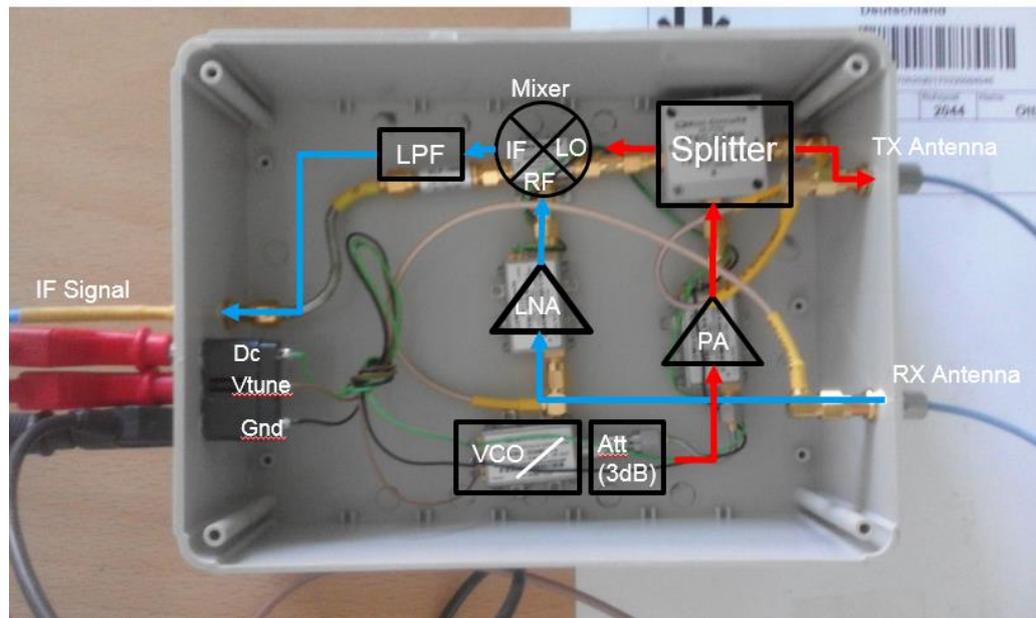
**Tabelle 2 Die verschiedenen Modi des Versuchsboards (English)**

## A.2 Radarversuch: von der Idee zum Entwurf



## A.3 Radarversuch: Aufbauschema der HF-Komponenten





#### A.4 Radarversuch: Liste der Komponenten

Name	Anzahl	Lieferant	Materialnummer
VCO	1	Mini-Circuits	ZX95-2536C+
PA/LNA	2	Mini-Circuits	ZX60-272LN-S+
Mischer	1	Mini-Circuits	ZX05-43MH-S+
LPF	1	Mini-Circuits	VLF-1000
Att	1	Mini-Circuits	VAT-3+
Splitter	1	Mini-Circuits	ZX1002042+
SMA-Verbinder Stecker-Stecker	3	Mini-Circuits	SM-SM50+
Kabelzubehör	3	Beliebige Firma	3,5 mm Stecker-Stecker, koaxial 50 Ohm, max. 50 cm lang
Antenne	2	<a href="#">ebay</a> /beliebige Firma	Jede beliebige 2,4-GHz-Antenne

Link auf [MIT: Anleitung zum Entwurf einer Kaffeedosen-Antenne](#)

## Rohde & Schwarz

Der Elektronikkonzern Rohde & Schwarz bietet innovative Lösungen auf den Arbeitsgebieten Messtechnik, Rundfunk- und Medientechnik, sichere Kommunikation, Cyber-Sicherheit sowie Funküberwachungs- und -ortungstechnik. Vor mehr als 80 Jahren gegründet, ist das selbstständige Unternehmen in über 70 Ländern mit einem engmaschigen Vertriebs- und Servicenetz präsent.

In seinen angestammten Arbeitsgebieten zählt der Elektronikkonzern zu den führenden Anbietern weltweit. Der Firmensitz ist in München, Deutschland. Ergänzend steuern je ein regionales Headquarter in Singapur sowie in Columbia, USA, die Geschäfte.

## Regional Kontakt

Europa, Afrika, Mittlerer Osten  
+49 89 4129 12345  
[customersupport@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport@rohde-schwarz.com)

Nord Amerika  
1 888 TEST RSA (1 888 837 87 72)  
[customer.support@rsa.rohde-schwarz.com](mailto:customer.support@rsa.rohde-schwarz.com)

Lateinamerika  
+1 410 910 79 88  
[customersupport.la@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.la@rohde-schwarz.com)

Asien Pazifik  
+65 65 13 04 88  
[customersupport.asia@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.asia@rohde-schwarz.com)

China  
+86 800 810 82 28 | +86 400 650 58 96  
[customersupport.china@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.china@rohde-schwarz.com)

## Nachhaltige Produktgestaltung

- Umweltverträglichkeit und ökologischer Fußabdruck
- Energie-Effizienz und geringe Emissionen
- Langlebigkeit und optimierte Gesamtbetriebskosten



Die Nutzung dieses Dokuments und der mitgelieferten Programme darf nur unter Anerkennung der Nutzungsbedingungen erfolgen, die im Downloadbereich der Rohde & Schwarz-Website aufgeführt sind.

R&S® ist eingetragenes Warenzeichen der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Eigennamen sind Warenzeichen der jeweiligen Eigentümer.