



Dokumentation

der Testmessungen mit dem AFE des Experimentes BEXUS-ELFI

Inhalt

1. Grundlagen, Vortest und Kanalmessungen
2. Messergebnisse mit Umgebungssignalen
3. Ausblick

Anhang

Literatur

- [1] Streicher, B.: ELFI AFE-Dokumentation. August 2020
- [2] Rohde & Schwarz: Bedienhandbuch RTH1002. 2017
- [3] Stephan, J.: Bedienungsanleitung Frequenzgenerator und -analysator ELFI. Oktober 2020

Danksagung

Dem Team vom ErlebnisZentrum Bergbau Röhrichtschacht Wettelrode wird für die Unterstützung der Messungen unter Tage herzlich gedankt.

Hinweis

Die Testmessungen dokumentieren den Funktionsnachweis des ELFI-Messaufbaus. Bei den Messergebnissen mit Umgebungssignalen handelt sich um nicht repräsentative Momentaufnahmen, aus denen sich keine belastbaren Aussagen über die Messumgebung ableiten lassen. Die Verwendung der Dokumentation oder von Bestandteilen oder von Messdaten ist nur mit Genehmigung des Autors erlaubt.

1. Grundlagen, Vortest und Kanalmessung

Systemstruktur

Basis bildeten das **Analog-Front-End (AFE)** des Experimentes BEXUS-ELFI in der Version 1, siehe [1], und die **2. Generation der Messspule** [Neitzke]. Der Kondensator mit 4,7 nF parallel zum Eingang der Stufe 1 wurde eingeschaltet. Als Messgerät diente das **Digital Oscilloscope RTH1002** von Rohde & Schwarz, siehe [2]. Die Versorgung des AFE und des Messgerätes erfolgte bei allen Messungen mit Batterien. Die Abbildung 1 stellt das System dar. Gemessen wurde mit dem **AFE-Board Nr. 2**. Die **Umgebungstemperatur** lag im Bereich von 15 °C bis 25 °C.

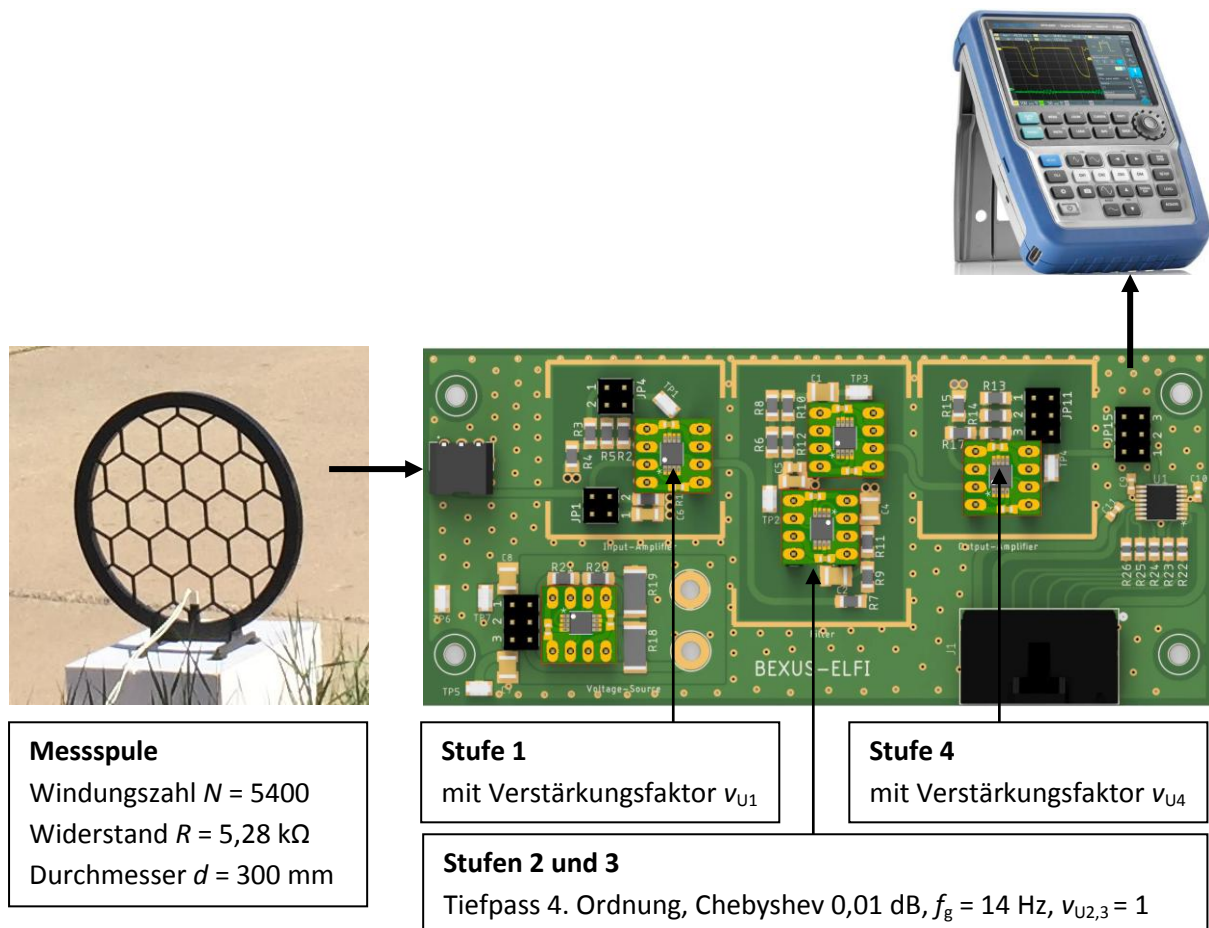


Abbildung 1: Systemübersicht [1, 2]

Anmerkungen zu Berechnungen mit der Angabe dBm sowie RMS

Die Angabe der Amplituden der FFT erfolgt durch das Digital Oscilloscope RTH1002 von Rohde & Schwarz, siehe [2], in der Einheit dBm. Es handelt sich dabei um den **absoluten Leistungspegel L_p** gemäß (1), bei welchem der Wert der vorliegenden Momentanleistung P auf den definierten Wert $P_0 = 1 \text{ mW}$ bezogen wird, beim RTH1002 basierend auf einem Scheinwiderstand von 50Ω .

$$L_p = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ dBm} \quad (1)$$

Die Berechnung der P zugrunde liegenden Spannung U erfolgt nach (2), mit $U_0 = 224 \text{ mV}$.

$$U = \sqrt{10^{0,1L_p} \cdot U_0^2} \quad (2)$$

Für die Berechnung des Leistungspegels benutzt das RTH1002 die **Spannungsangabe RMS** (Root Mean Square, Effektivwert), berechnet im RTH1002 mit dem Näherungsverfahren nach (3).

$$U_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^2} \quad (3)$$

Grundrauschen

Die Abbildungen 2 und 3 stellen das Amplitudenspektrum des Grundrauschens dar.

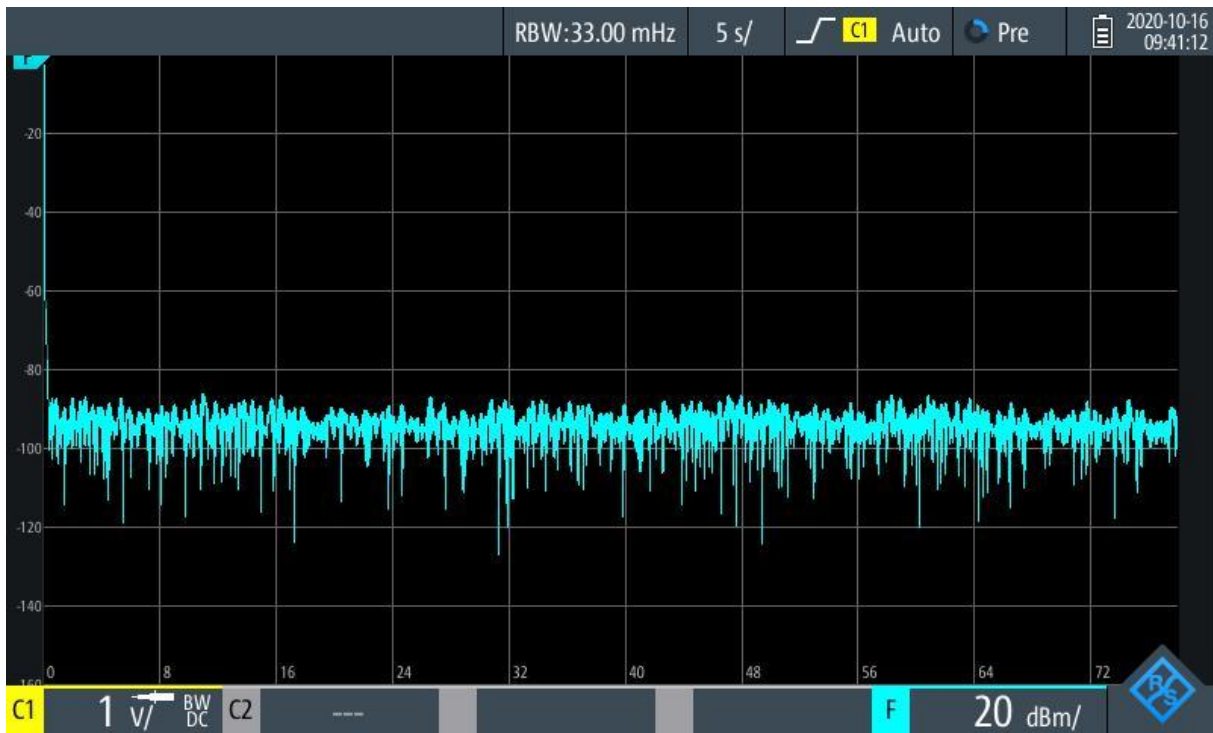


Abbildung 2: Grundrauschen am AFE-Ausgang, bis 80 Hz, kurzgeschlossener AFE-Eingang, $v_U = 57057$

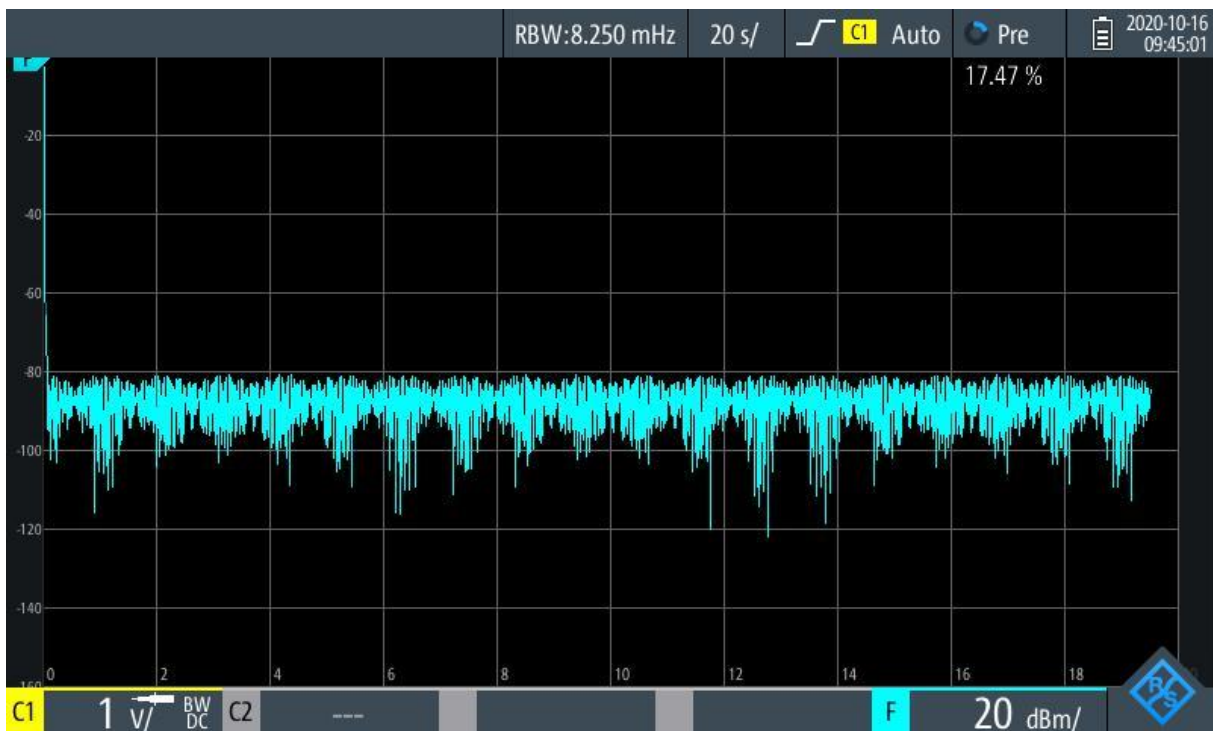


Abbildung 3: Grundrauschen am AFE-Ausgang, bis 20 Hz, kurzgeschlossener AFE-Eingang, $v_U = 57057$

Vortest mit ELFI-Testgenerator

Der Vortest beinhaltet die Einspeisung eines **Magnetfeldes in die Messspule**. Erzeugt wurde das Feld durch den ELFI-Testgenerator, siehe [3]. Dabei handelt es sich um einen Sinusgenerator mit angeschlossener Erregerspule und stufenweise einstellbarer Frequenz (7 Hz, 16 Hz, 30 Hz, 50 Hz). Beispielhaft wurden **7 Hz** genutzt. Ziel des Vortests war der qualitative Funktionsnachweis der Messanordnung gemäß Abbildung 1. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Signale am AFE-Ausgang. Das Signal mit 7 Hz war am Ausgang sichtbar.

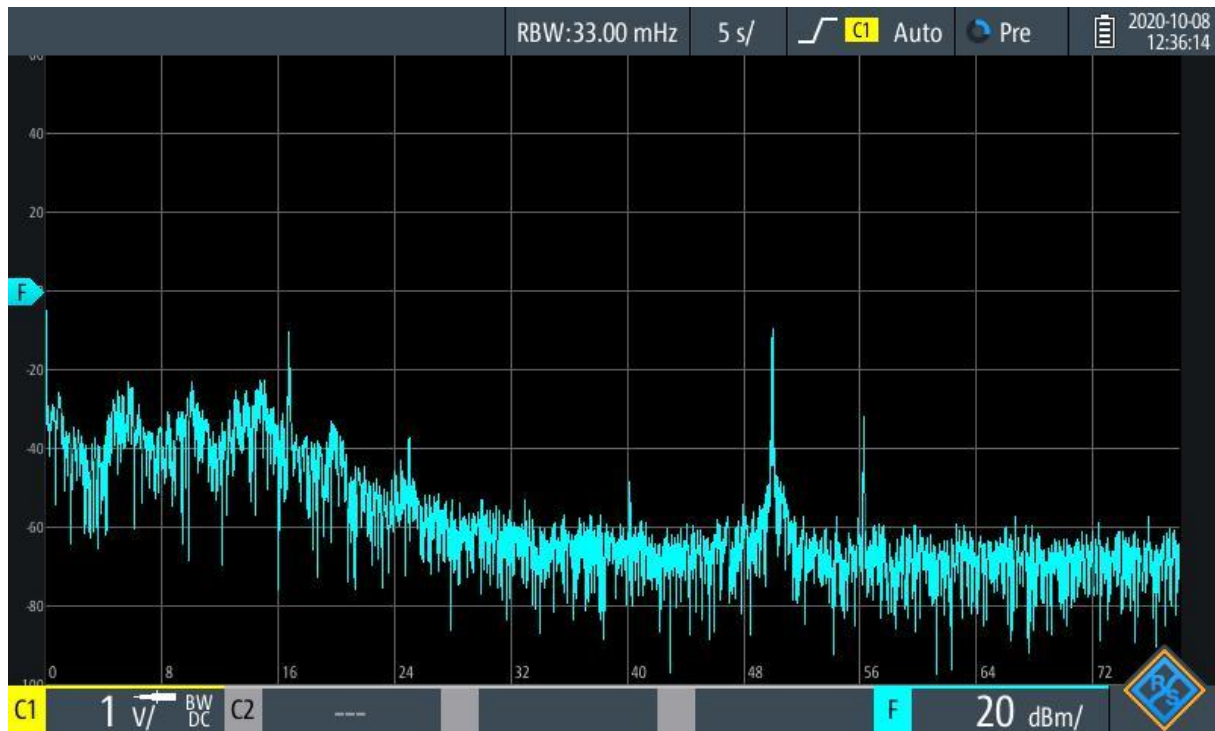


Abbildung 4: Referenzbild ohne Generatorsignal, $v_U = 23809$, Labor LEDS

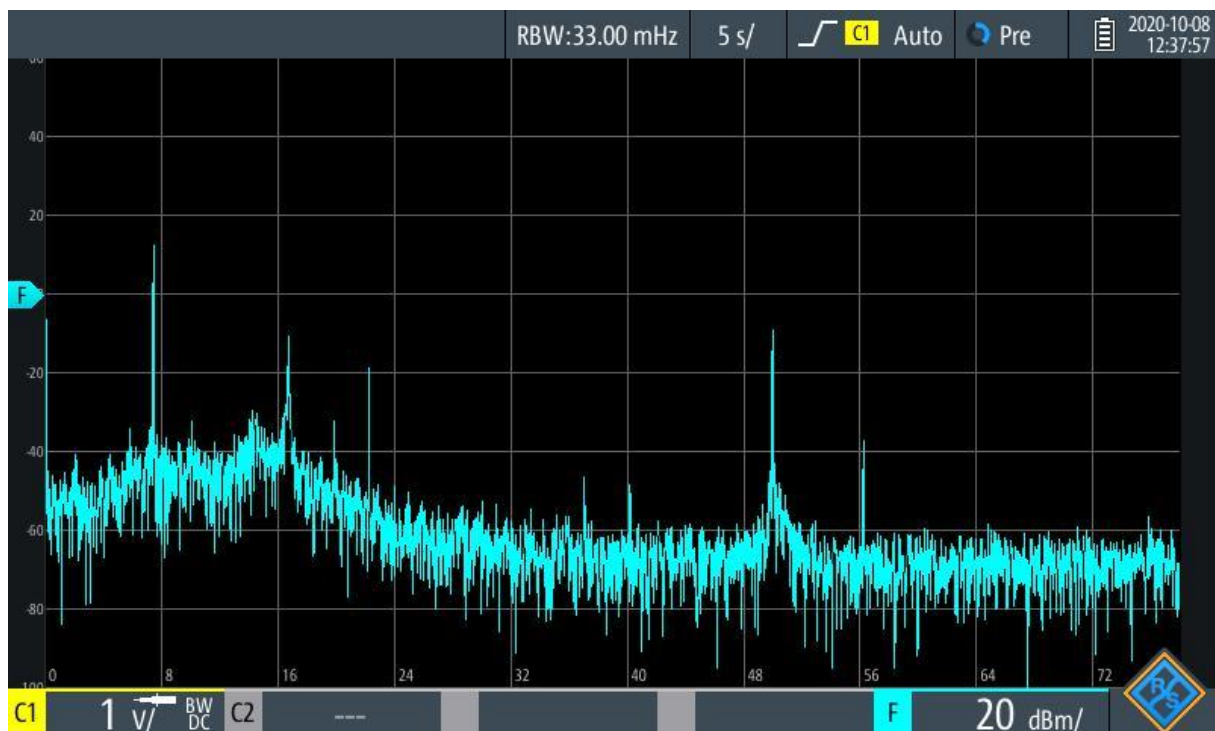


Abbildung 5: Prüfsignal 7 Hz am AFE-Ausgang, $v_U = 23809$, Labor LEDS

Kanalmessungen

Die Kanalmessungen dienten der Verifizierung der technischen Daten des AFE, siehe [1]. Die **Verstärkungsfaktoren** v_{U1} und v_{U4} konnten durch Messungen bestätigt werden. Die **Analyse der Filterstufe** erfolgte durch Anlegen des Signals U_{ess} (Spitze-Spitze) eines Sinusgenerators an den Filtereingang und das Messen des Signals U_{ass} am Filterausgang mit anschließender Berechnung der Dämpfung a gemäß (4). Die Tabelle 1 stellt die Messergebnisse dar.

Tabelle 1: Messergebnisse

f	U_{ess}	U_{ass}	$a = 20 \lg \frac{U_e}{U_a} \text{ dB} \quad (4)$
7 Hz	2 V	1,89 V	0,49 dB
14 Hz	2 V	1,396 V	3,12 dB
16,7 Hz	2 V	831,4 mV	7,62 dB
50 Hz	2 V	9,725 mV	46,26 dB

Zum Vergleich sind die Ergebnisse der **Simulation mit LTspice**, siehe Tabelle 2 und Abbildung 6, sowie Angaben aus dem **Tool Analog Filter Wizard**, siehe Abbildungen 7 und 8, aufgeführt.

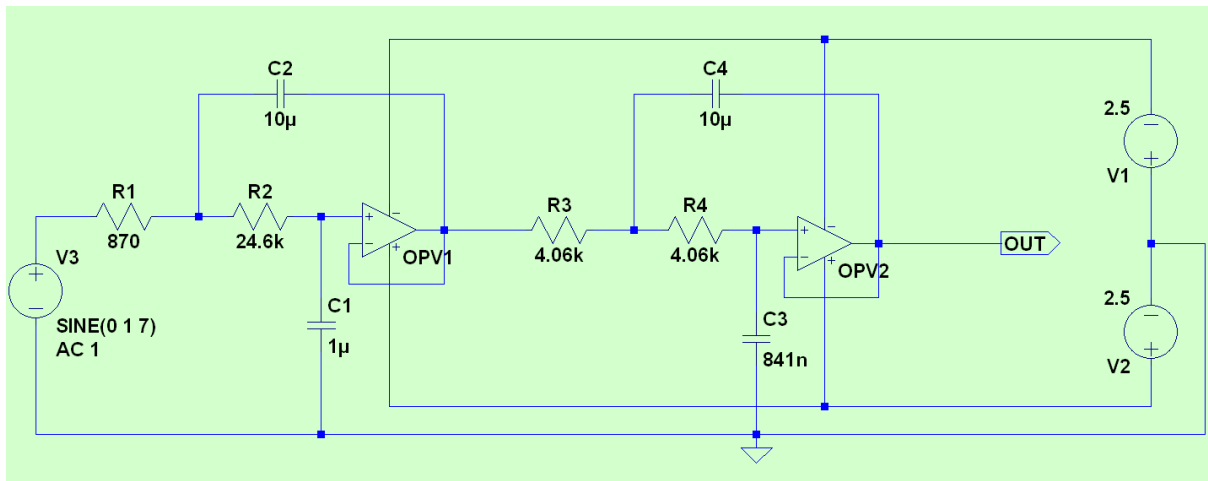


Abbildung 6: Filterstufe in der Simulation

Tabelle 2: Simulationsergebnisse

f	U_{ess}	U_{ass}	$a = 20 \lg \frac{U_e}{U_a} \text{ dB}$
7 Hz	2 V	2 V	0 dB
14 Hz	2 V	1,41 V	3,04 dB
16,7 Hz	2 V	744 mV	8,59 dB
50 Hz	2 V	7,3 mV	48,75 dB

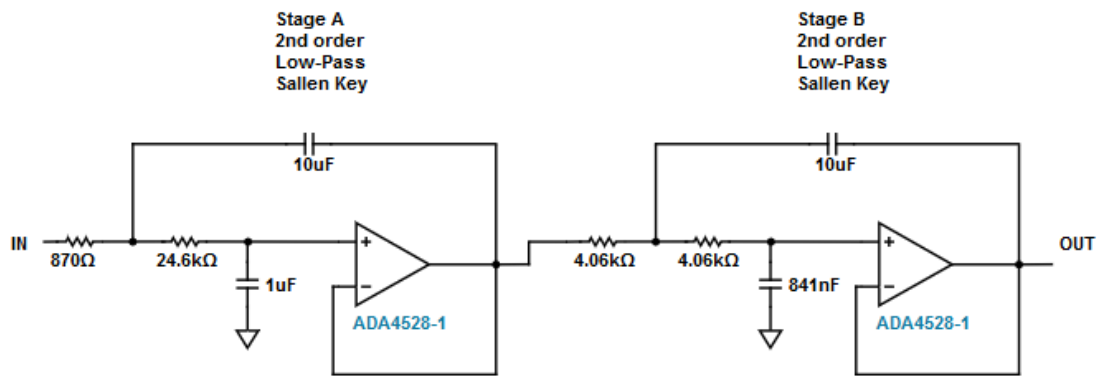


Abbildung 7: Filterstufe im Analog Filter Wizard

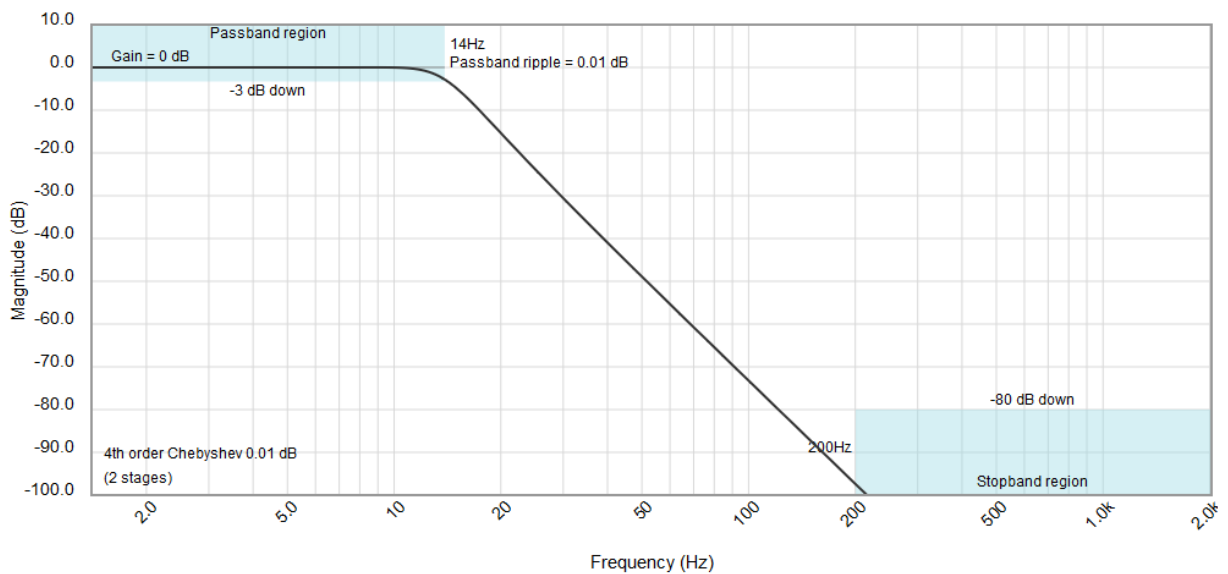


Abbildung 8: Amplitudenverlauf im Analog Filter Wizard

Möchte man bei der vollständigen Nutzung des Kanals (Verstärker- und Filterstufen) aus dem gemessenen Wert L_p die anliegende Spulenspannung U_s berechnen, erfolgt dies gemäß (5). Mit (5) und den messtechnisch ermittelten Dämpfungswerten aus der Tabelle 1 wurde die Spulenspannung in der Tabelle 3 kalkuliert, siehe auch Hinweiskasten „Genauigkeit“ unter Punkt 2.

$$U_s = \frac{10^{\frac{a}{20}}}{v_{U1} \cdot v_{U4}} \sqrt{10^{0,1L_p} \cdot U_0^2} \quad (5)$$

$$U_0 = 224 \text{ mV}$$

2. Messergebnisse mit Umgebungssignalen

Im Rahmen der Messungen von Umgebungssignalen wurden Aufnahmen vom Messdisplay angefertigt. Es handelt sich jeweils um das (analoge) **Signal** und um das **FFT-Amplitudenspektrum**. Die Darstellungen des Signalverlaufs und des Amplitudenspektrums jeweils eines Messortes entstammen **unterschiedlichen Zeitpunkten**.

Messorte für Umgebungssignale

- A Umspannwerk Energieversorgung 50 Hz, Messung neben Freifeldanlage, Abstand etwa 40 m
- B Umspannwerk Bahn 16,7 Hz, Abstand Messung etwa 150 m von Einspeisung und Fahrdrabt
- C Unter Hochspannungsleitung 220 kV, 50 Hz in Edersleben, ca. 25 m Höhe
- D Messung im Wald, Nähe Wippa
- E Unter Tage im Röhrigschacht Wettelrode, Kupferschiefer, 283 m Tiefe
Hinweis: Standortumgebung unter Tage mit Trafostation, Kabeltrassen, Pumpen, Lüfter, geerdeten Schienen

Messdatenübersicht

Der Tabelle 3 sind die Messdaten zu entnehmen. Anschließend sind die Aufnahmen zu sehen, welche an den Messorten gefertigt wurden.

Die Ergebnisse der Messungen von Umgebungssignalen mit 16,7 Hz und 50 Hz erscheinen plausibel. Die Spulenspannung besitzt in der Nähe des **Umspannwerkes Bahn ihr Maximum für 16,7 Hz mit $U_{s,16} = 313 \mu V$** und unter der **Hochspannungsleitung ihr Maximum für 50 Hz mit $U_{s,50} = 47,6 mV$** . Beide Frequenzen haben ihr **Minimum im Wald mit $U_{s,16} = 2,1 \mu V$ und $U_{s,50} = 2,55 \mu V$** .

Betrachtung zur Verstärkungsreserve für 7 Hz

Die maximale, übersteuerungsfreie Amplitude der analogen Ausgangsspannung des AFE beträgt idealisiert $U_{AFE,max} = \pm 2,5 V$. Als Betrachtungsbeispiel soll der Wert der Spulenspannung am Messort D (Wald) dienen, siehe Tabelle 3, mit $U_s \approx 2,1 \mu V$ (RMS) bzw. Amplitudenwert $U_{s,max} \approx 3 \mu V$. Aus dem Amplitudenverhältnis folgt der maximale Verstärkungswert $v_{U,max} \approx 833333$. Für ein Signal mit 7 Hz ohne Filterwirkung beträgt der maximale Verstärkungswert des AFE $v_{AFE,max} = 57057$, so dass ein **zusätzlicher Faktor von etwa 14,6** zum Einsatz kommen kann. Der **ADC ADS1220 mit seinem PGA** nach dem Analogkanal des AFE kann diesen zusätzlichen Faktor und eine **Automatic Gain Control (AGC)** bieten. Seine Stufen sind: $v_{PGA} = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$. Er kann mit einer Eingangsspannung von 0 V bis +5 V beschaltet werden, entsprechend $\pm U_{AFE,max}$ (mit Bezug auf -2,5 V Betriebsspannung AFE).

Analysiert man den Leistungspegel $L_{P,Wald}$ der oben erwähnten Messung bei 16,7 Hz am Messort D im Wald und den Leistungspegel $L_{P,GR}$ des **Grundrauschens (GR)** gemäß Abbildung 3, ergeben sich folgende Werte, mit Umrechnung in RMS gemäß (2): $L_{P,Wald} \approx -13 dBm$ und $L_{P,GR} \approx -80 dBm$ sowie $U_{Wald} \approx 50 mV$ und $U_{GR} \approx 22,4 \mu V$.

Mit dem Einsatz der 3. Generation der Messspule, welche deutlich größer sein wird, sind die Verstärkungsfaktoren zu verifizieren.

Genauigkeit

Die Genauigkeit der Ergebnisse kann (zuzüglich zur Toleranz der Bauelemente, zur Testsignalqualität, zur Güte der Messgeräte) durch folgende Sachverhalte beeinflusst werden:

- a) Bei der Ermittlung der Spannungsangabe RMS nach (3) handelt es sich um ein Näherungsverfahren.
- b) Die Berechnung der Filtercharakteristik und die Messung der Dämpfungswerte, siehe Tabelle 1, sowie die Umrechnung von RMS in Amplitude mithilfe des Scheitelfaktors 1,414 basieren auf der Sinusform. Die Form der Umgebungssignale kann davon abweichen, im Extremfall als Übersteuerung, siehe Abbildungen B4 und C2.

Tabelle 3: Messdatenübersicht

Ort	Datum, Uhrzeit FFT	Abbildungen				Absoluter Leistungspegel L_p			Faktoren $v_{U2,3} = 1$		Ausrichtung Spulenachse	Berechnung RMS Spulen- spannung U_s
		Ort	Signal	FFT	Spez.	16,7 Hz	50 Hz	weitere	v_{U1}	v_{U4}		
A Umspannwerk 50 Hz	06.09.2020 13.54 Uhr	A1	A2	A3		8 dBm	0 dBm		19,7	1001	N-S	$U_{s,16} \approx 69 \mu V$ $U_{s,50} \approx 2,34 \text{ mV}$
B Umspannwerk 16,7 Hz	06.09.2020 14.07 Uhr	B1	B2	B3	B4	15 dBm	-25 dBm		29	333,7	NO-SW	$U_{s,16} \approx 313 \mu V$ $U_{s,50} \approx 268 \mu V$
C Hochspannung 50 Hz	06.09.2020 14.26 Uhr	C1	C2	C3		-10 dBm	20 dBm		29	333,7	NW-SO quer zur Leitung	$U_{s,16} \approx 17,6 \mu V$ $U_{s,50} \approx 47,6 \text{ mV}$
D Wald	06.09.2020 15.19 Uhr	D1	D2	D3	D4	-13 dBm	-50 dBm	2,5 Hz mit 2 dBm 4 Hz mit -3 dBm	57	1001	O-W	$U_{s,16} \approx 2,1 \mu V$ $U_{s,50} \approx 2,55 \mu V$
E Bergwerk	11.09.2020 10.37 Uhr	E1	E2	E3	E4	-9 dBm	-9 dBm	24 Hz mit -38 dBm und andere Frequenzen	57	1001	NO-SW	$U_{s,16} \approx 3,35 \mu V$ $U_{s,50} \approx 287 \mu V$

Beispielrechnung U_s als RMS am Ort A gemäß (5):

$$U_{s,16} = \frac{10^{\frac{a}{20}}}{v_{U1} \cdot v_{U4}} \sqrt{10^{0,1L_p} \cdot U_0^2} = \frac{2,404}{19,7 \cdot 1001} \sqrt{10^{0,1 \cdot 8} \cdot 5,02 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2} = 6,861 \cdot 10^{-5} \text{ V} \approx 69 \mu V$$

$$U_{s,50} = \frac{10^{\frac{a}{20}}}{v_{U1} \cdot v_{U4}} \sqrt{10^{0,1L_p} \cdot U_0^2} = \frac{205,59}{19,7 \cdot 1001} \sqrt{1 \cdot 5,02 \cdot 10^{-2} \text{ V}^2} = 2,335 \cdot 10^{-3} \text{ V} \approx 2,34 \text{ mV}$$

$$U_0 = 224 \text{ mV}$$

Dämpfungswerte a aus Tabelle 1

3. Ausblick

Die nächsten Testmessungen erfolgen mit der Spule der 3. Generation, welche einen Durchmesser von 79 cm besitzt, siehe Abbildung 9. Im Mittelpunkt der Untersuchungen wird die Änderung der Signalamplitude stehen. Darüber hinaus soll ein gezielter Blick auf Signale um 7 Hz erfolgen.



Spule 1 der 3. Generation:

$$d_{\text{Draht}} = 0,2 \text{ mm}$$

$$m_{\text{Draht}} = 2 \text{ kg}$$

$$l_{\text{Draht}} = 7105 \text{ m}$$

$$d_{\text{Spule}} = 79 \text{ cm}$$

$$R = 3,65 \text{ k}\Omega$$

$$N = 2863$$

$$F_{\text{Spule}} = 1403 \text{ m}^2$$

Abbildung 9: Spule 1 der 3. Generation

Anhang

Messortspezifische Aufnahmen [Aufnahmen: K. Klein]



Abbildung A1: Messort A (Umspannwerk Energieversorgung 50 Hz)

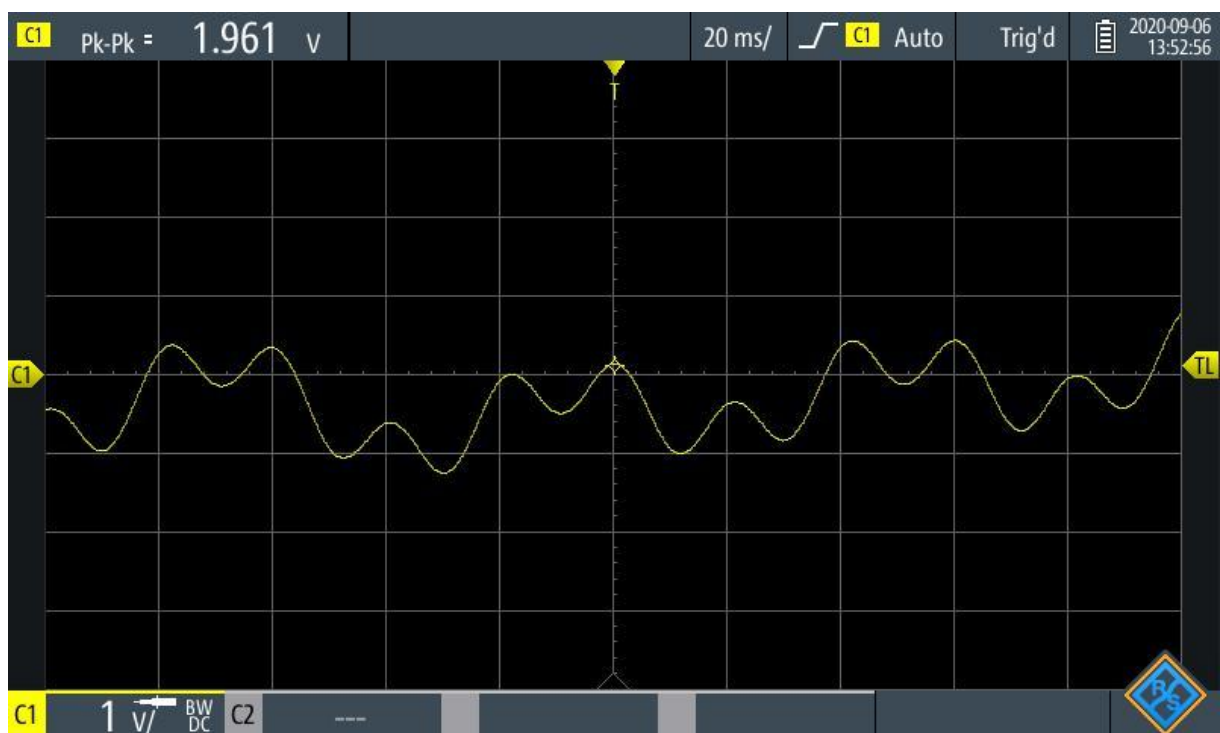


Abbildung A2: Signal am Messort A

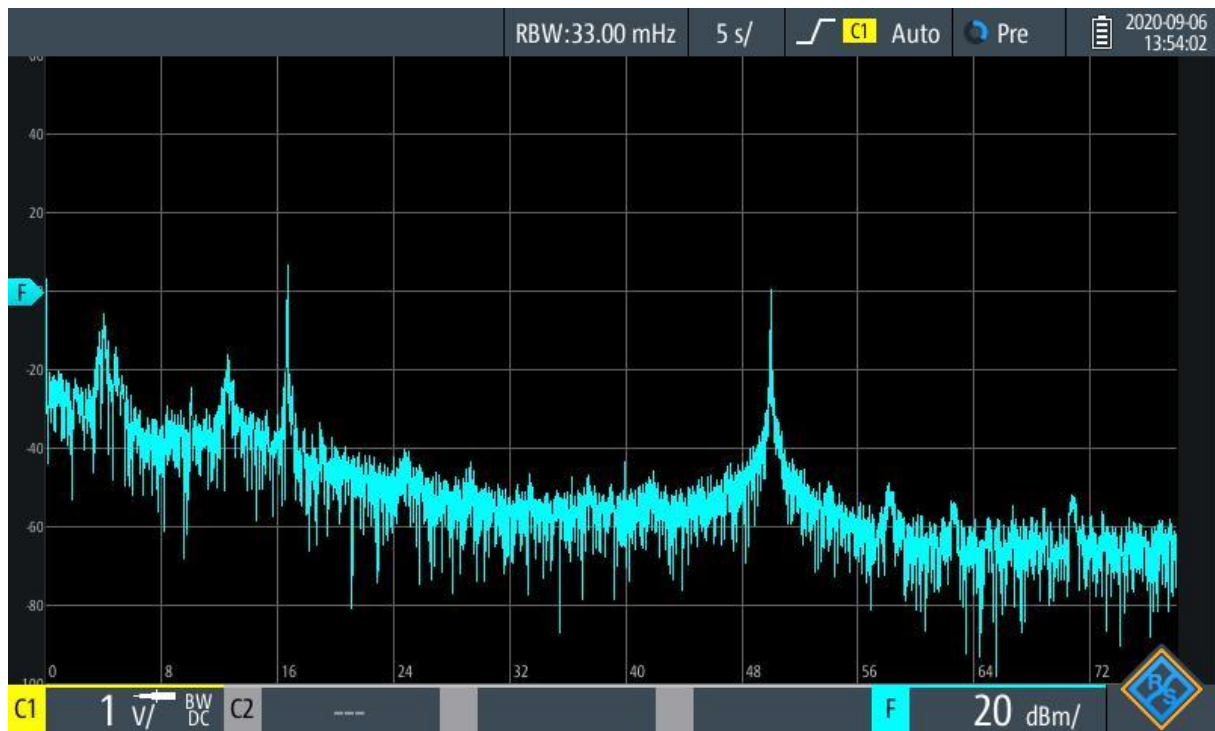


Abbildung A3: FFT am Messort A

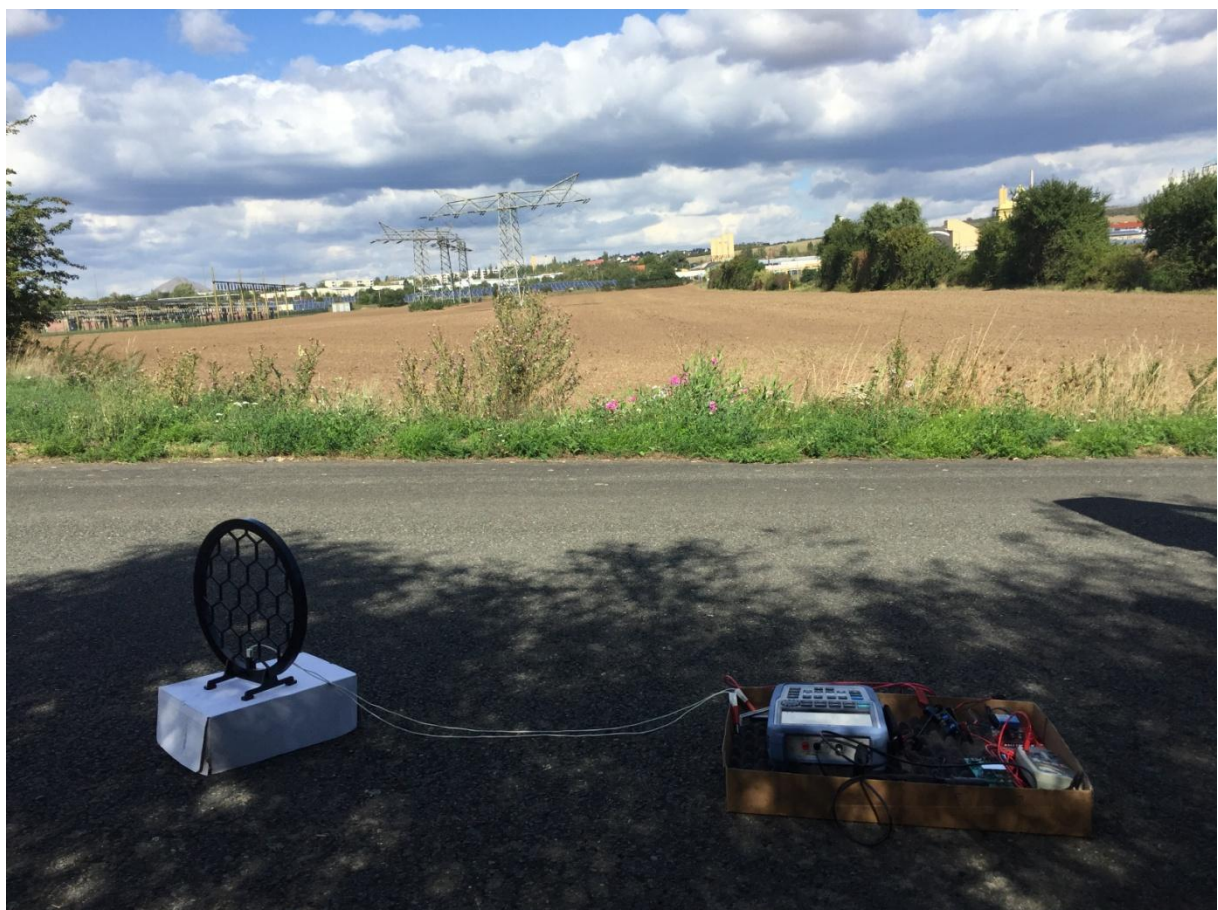


Abbildung B1: Messort B (Umspannwerk Bahn 16,7 Hz)

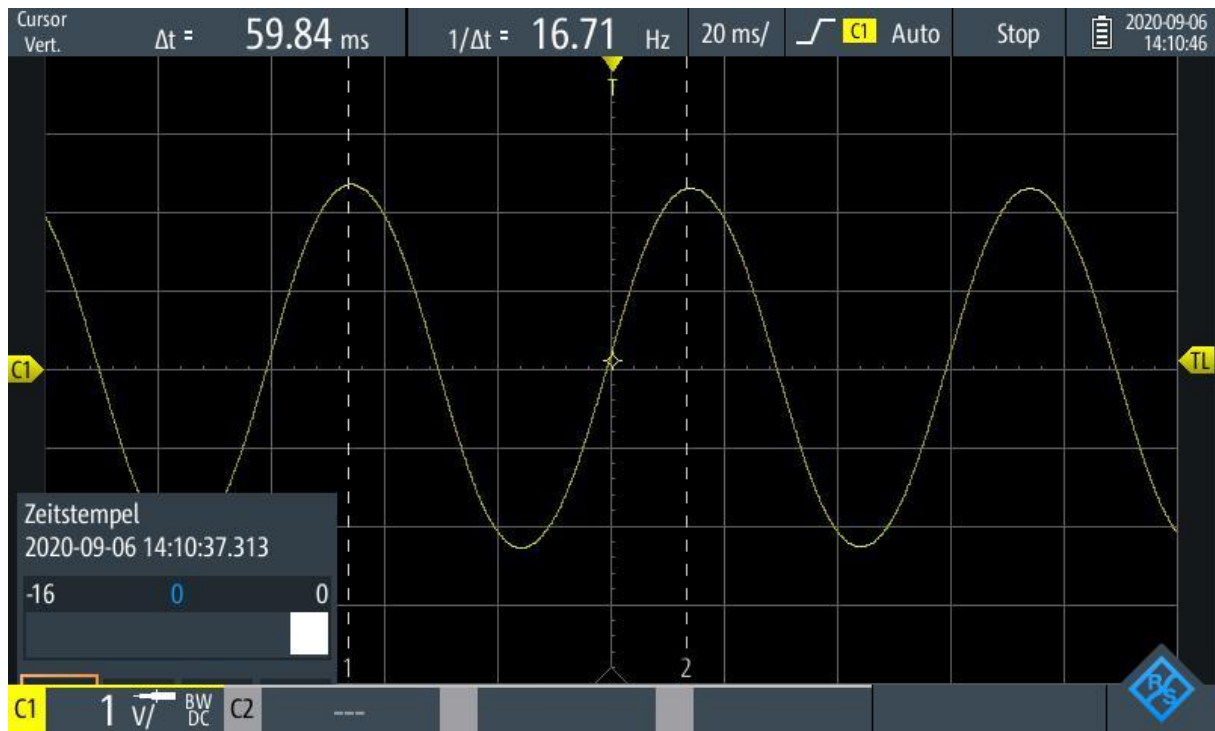


Abbildung B2: Signal am Messort B

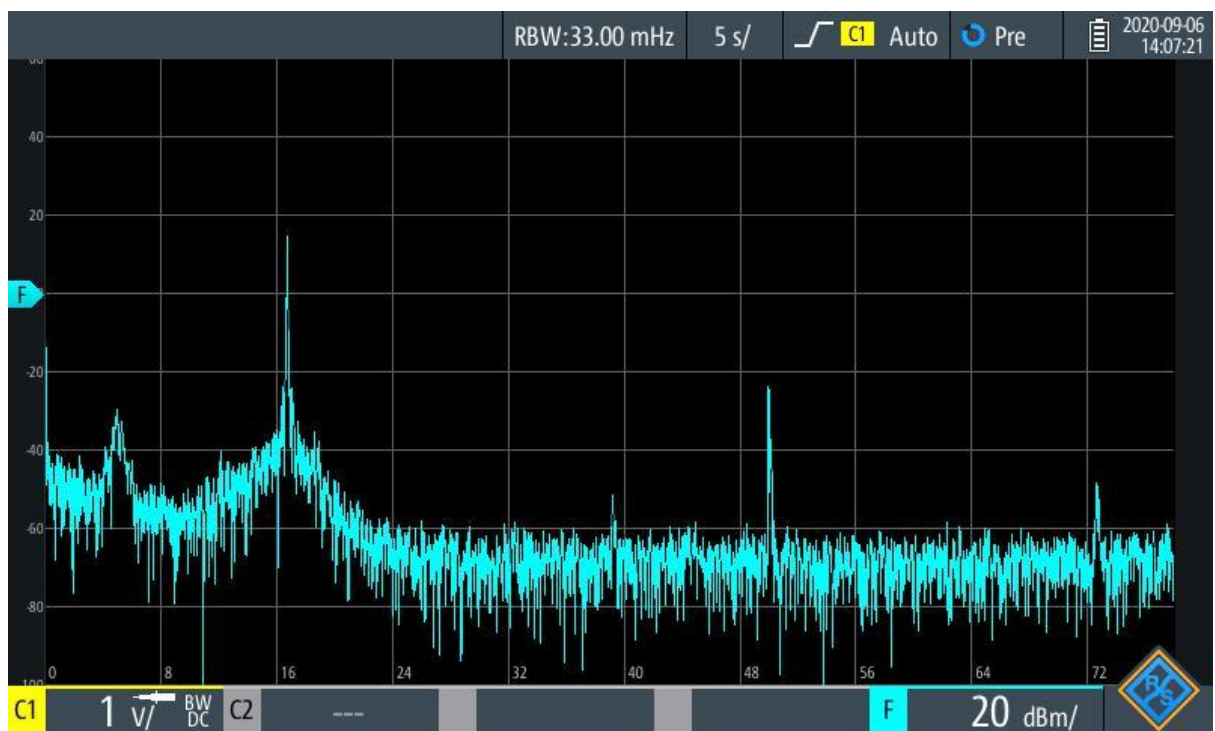


Abbildung B3: FFT am Messort B

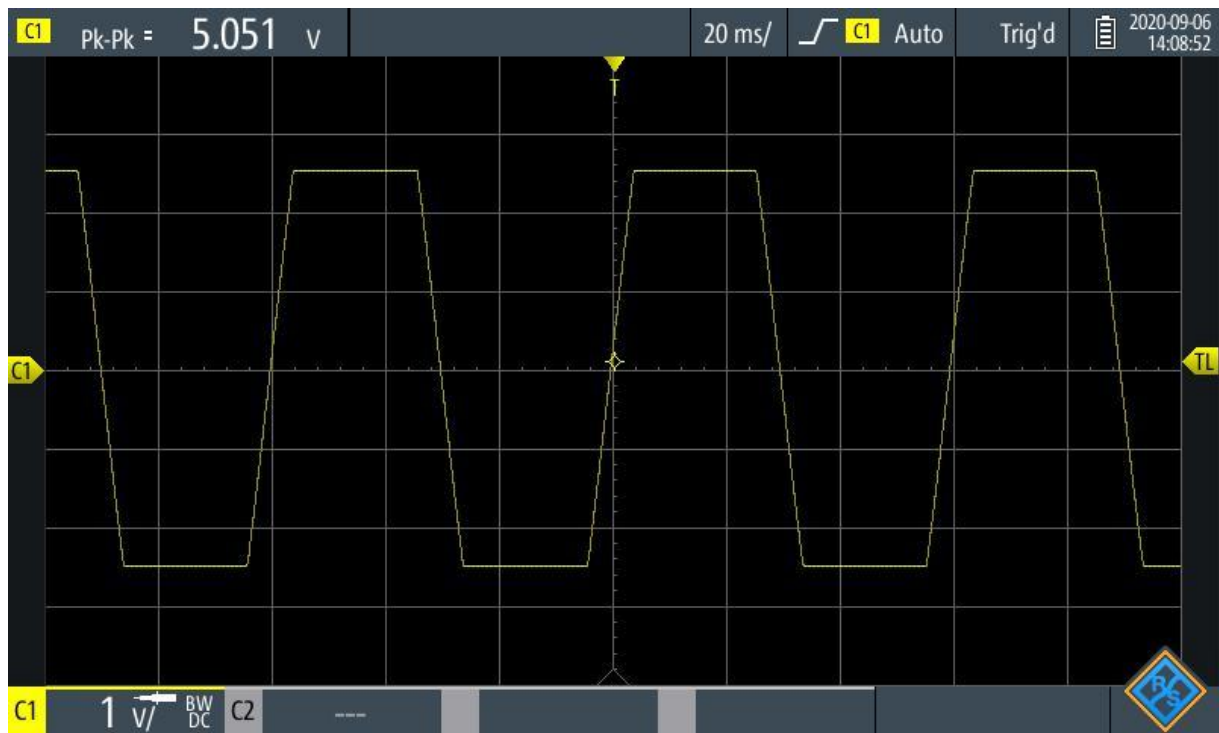


Abbildung B4: Übersteuertes Signal am Messort B



Abbildung C1: Messort C (Hochspannungsleitung)

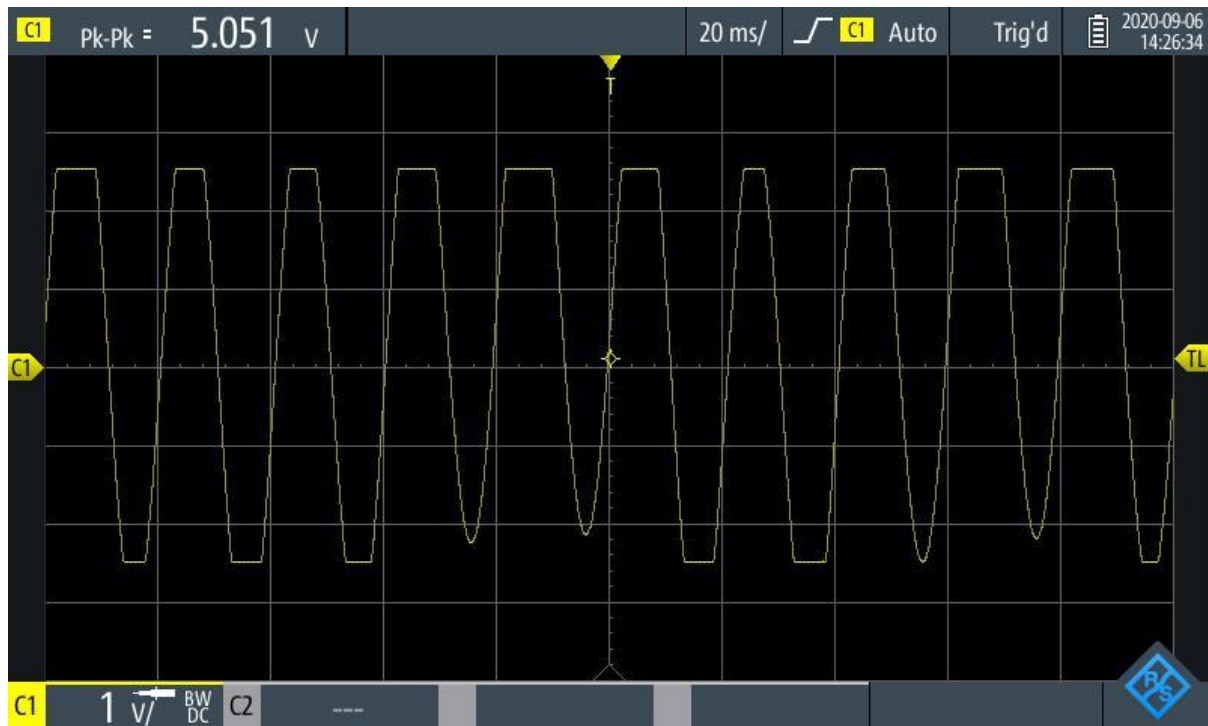


Abbildung C2: Übersteuertes Signal am Messort C

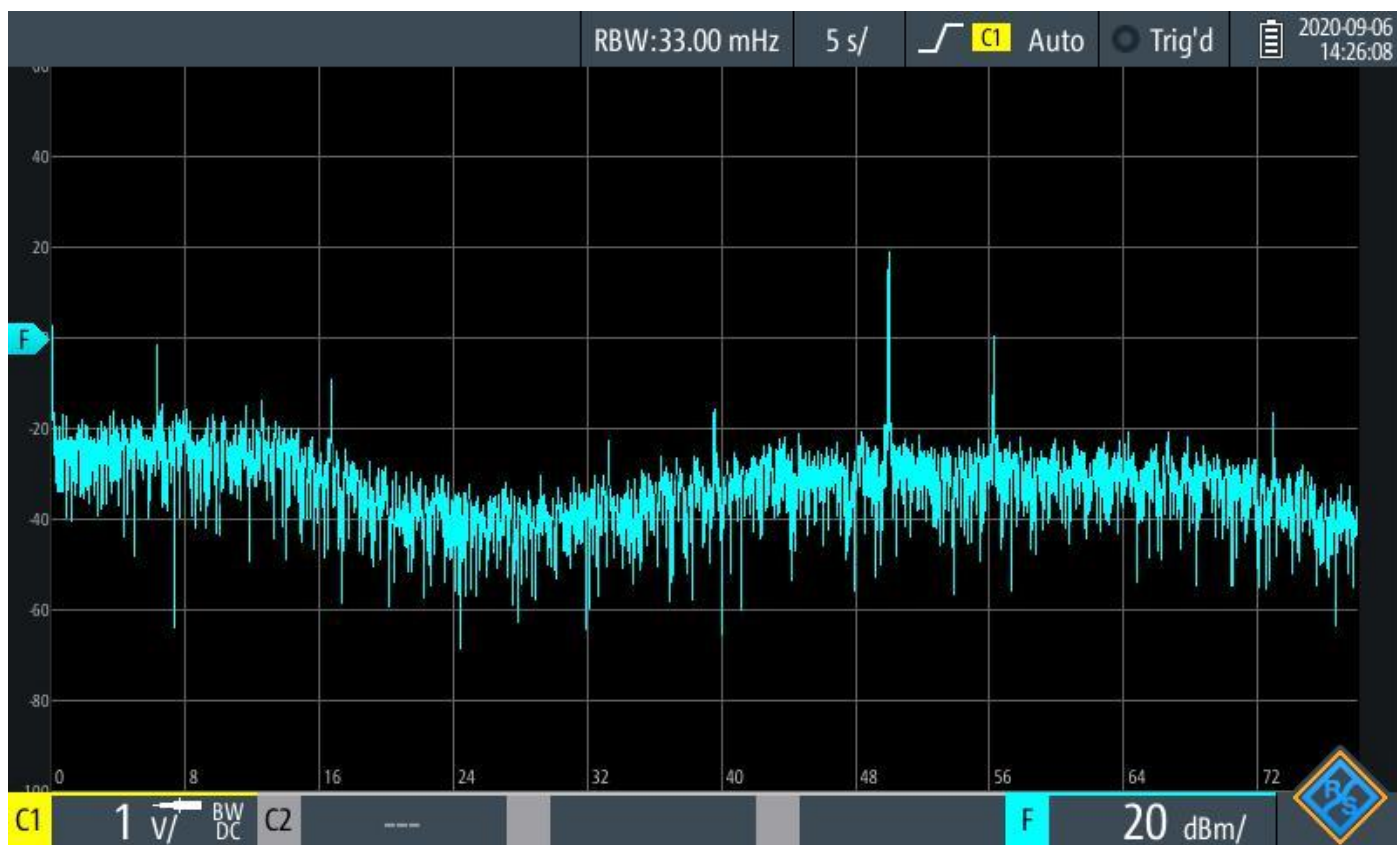


Abbildung C3: FFT am Messort C



Abbildung D1: Messort D (Wald)

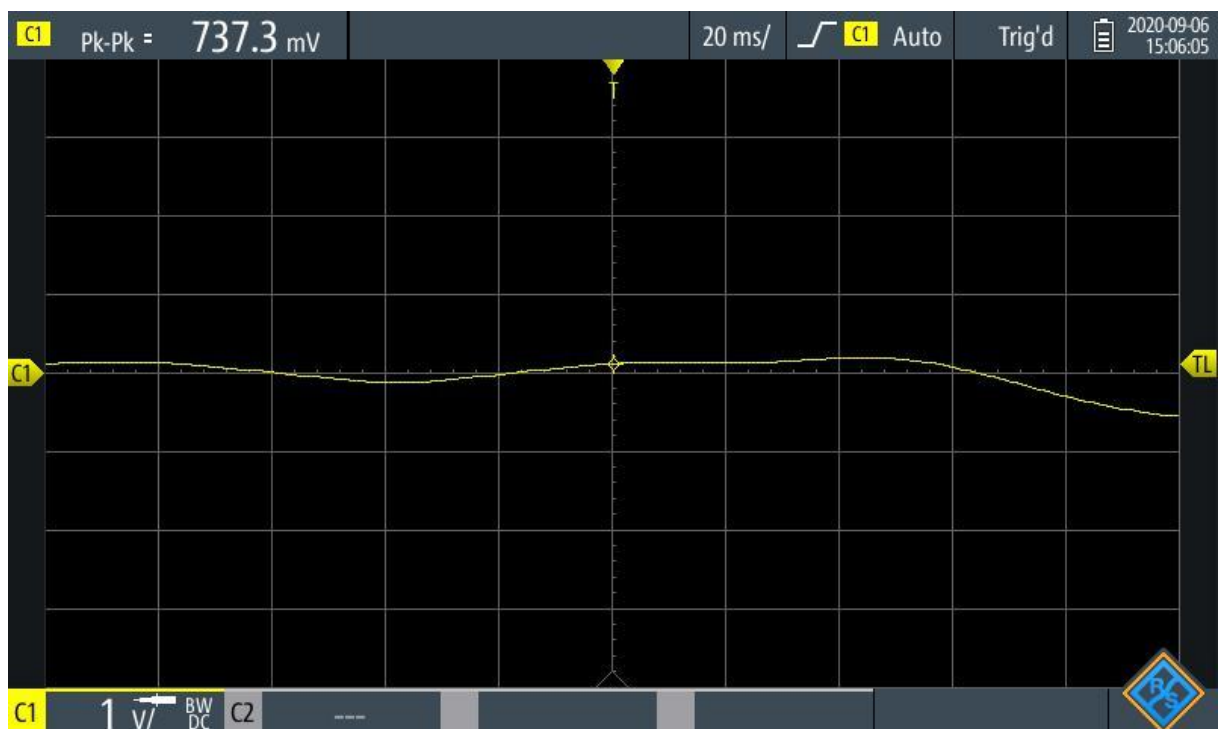


Abbildung D2: Signal am Messort D

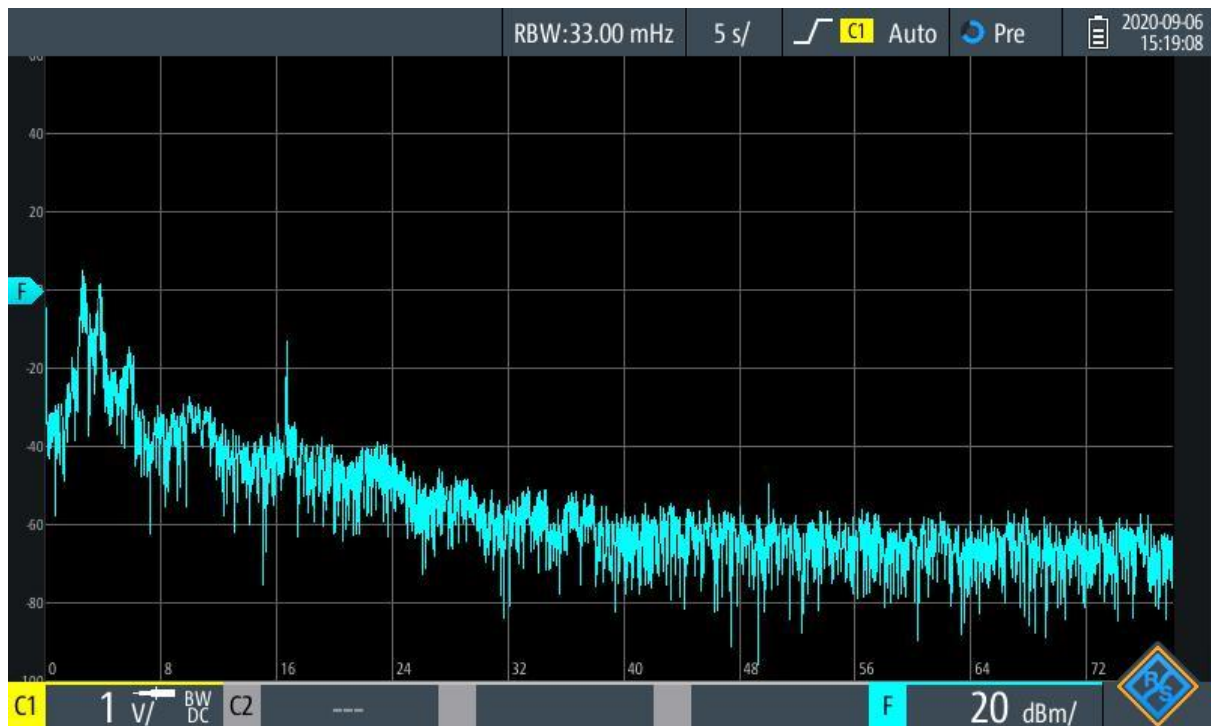


Abbildung D3: FFT am Messort D

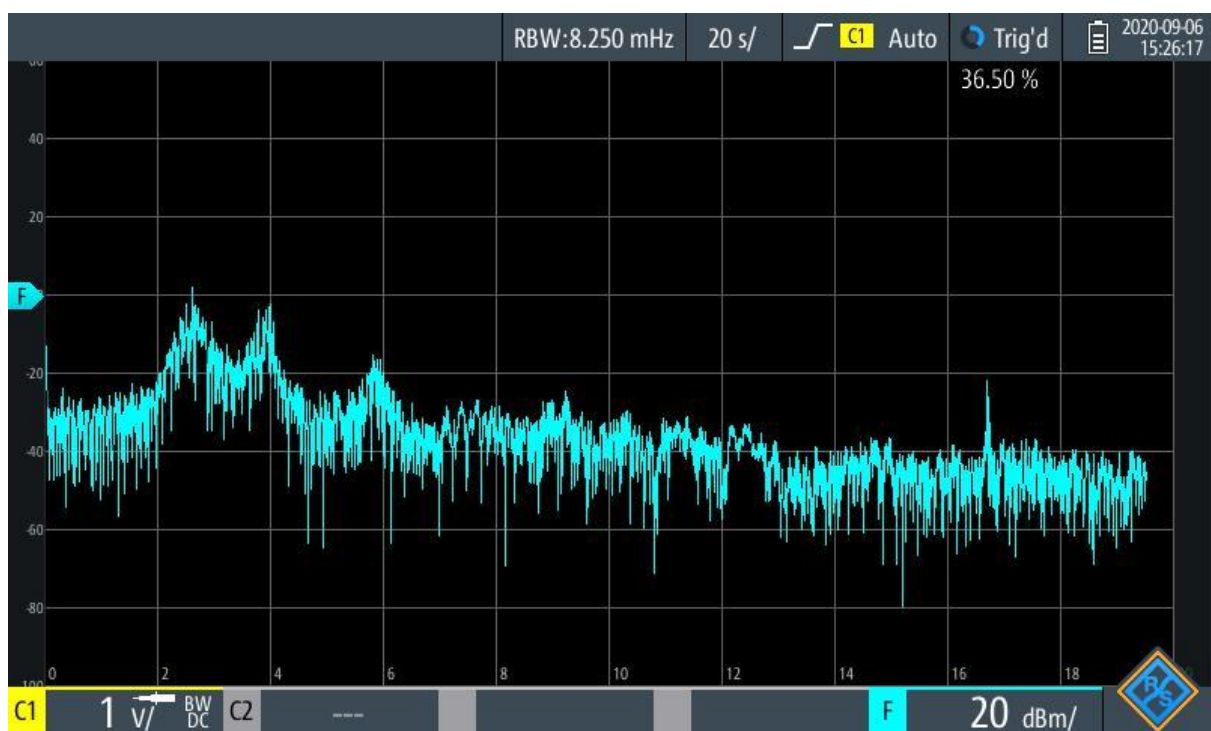


Abbildung D4: FFT am Messort D mit reduziertem Frequenzbereich bis 20 Hz



Abbildung E1: Messort E (Bergwerk)

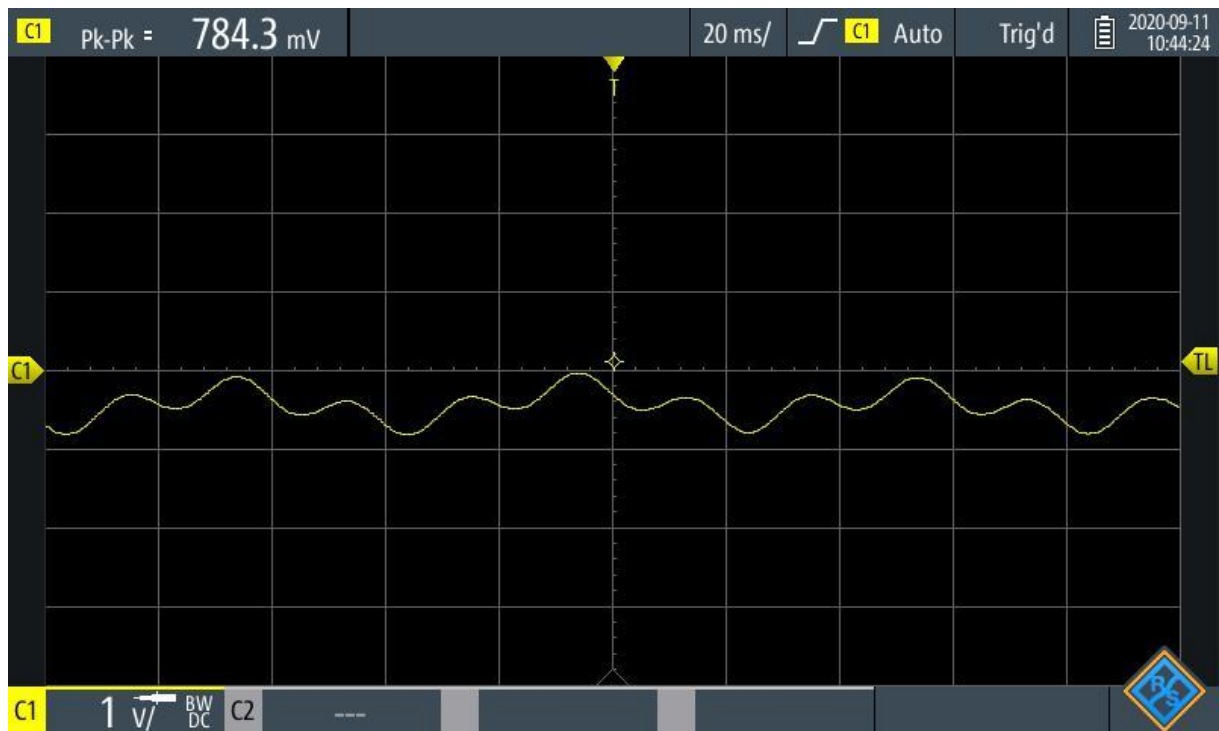


Abbildung E2: Signal am Messort E

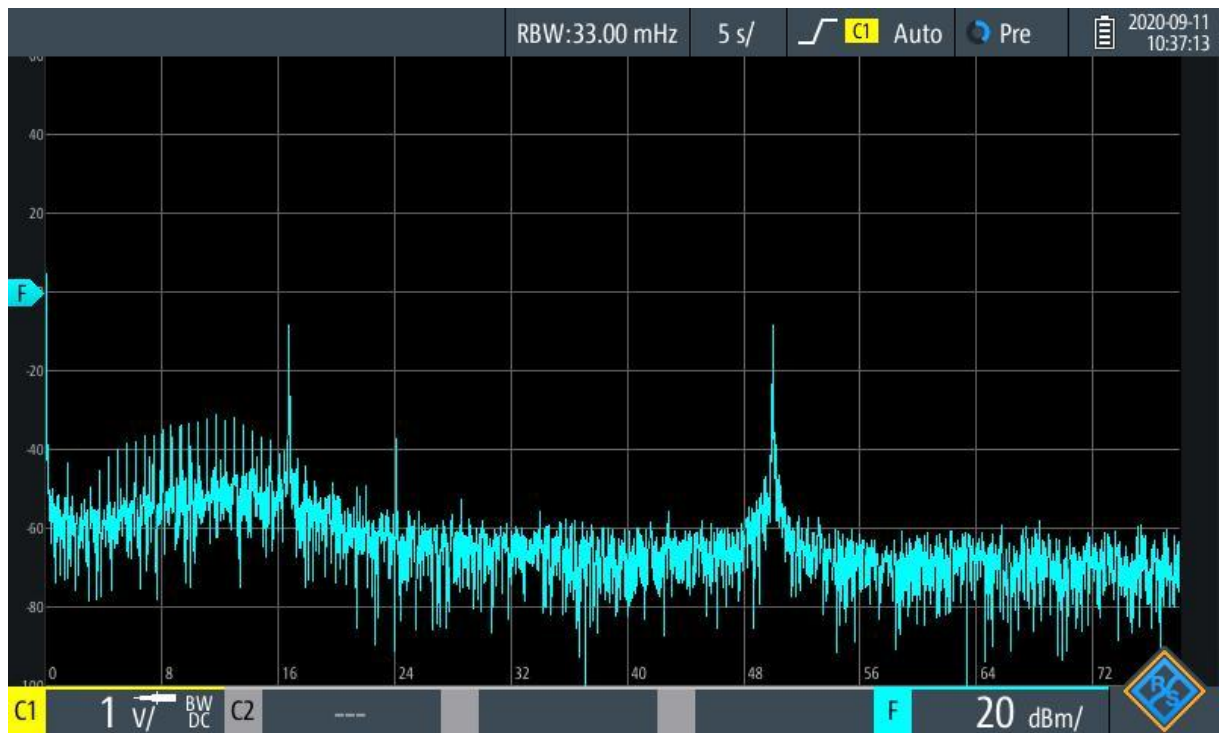


Abbildung E3: FFT am Messort E

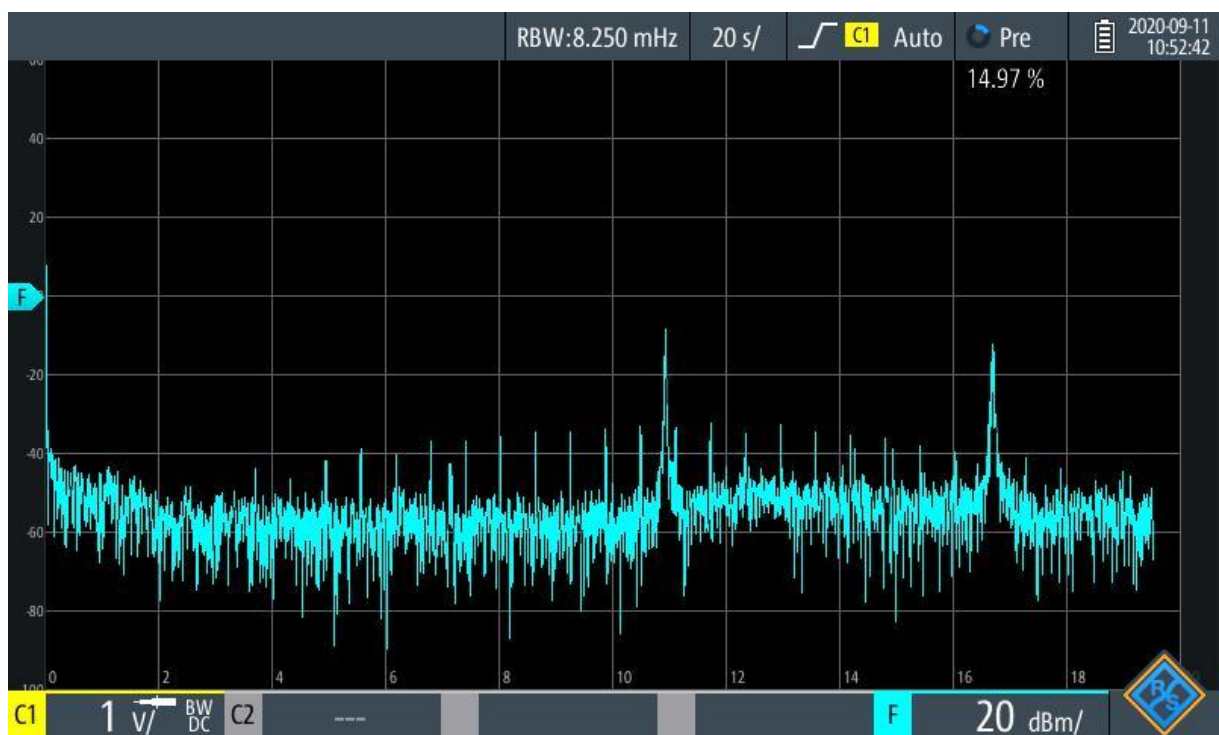


Abbildung E4: FFT am Messort E mit reduziertem Frequenzbereich bis 20 Hz