



# Untersuchung Rauschverhalten

X-106 mit Empfindlichkeit  $0...30\mu\epsilon$

Mirco Huber  
X-Sensors AG  
Landenbergerstrasse 13  
CH-8253 Diessenhofen

23. Oktober 2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Erste Messkampagne vom 21.07.23</b>	<b>1</b>
1.1	Versuchsaufbau . . . . .	1
1.2	Resultate & Diskussion . . . . .	2
1.2.1	Modifikation 70 Hz . . . . .	2
1.2.2	Modifikation 100 Hz . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Zweite Test Messkampagne vom 06.08.23</b>	<b>11</b>
2.1	Signalverlauf bei Belastungen . . . . .	11
2.2	Fourier-Analyse NP-Signale . . . . .	12
2.3	Langzeitbetrachtung Nullpunkt . . . . .	14
2.4	Empfehlungen weiteres Vorgehen . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Dritte Messkampagne vom 10.08.23</b>	<b>18</b>
3.1	Vergleich DuT 100Hz (vergossen) vs DuT 40Hz (unvergossen) . . . . .	18
3.2	Vergleich DuT 500Hz (unvergossen) vs DuT 20Hz (unvergossen) . . . . .	23

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Versuchsaufbau; grün: DuT, grau: Referenz . . . . .	1
1.2	Signalverlauf Referenzsensor . . . . .	2
1.3	Signalverlauf DuT . . . . .	3
1.4	Vergleich Referenz und DuT . . . . .	3
1.5	Ausschnitt aus Vergleich (Abbildung 1.4) . . . . .	4
1.6	Vergleich des Nullpunktsignals (DuT und Referenz in Ruhe auf einer Tischfläche liegend) . . . . .	5
1.7	(Fast) Fouriertransformation der Nullpunktsignale . . . . .	5
1.8	Signalverlauf Referenzsensor . . . . .	6
1.9	Signalverlauf DuT . . . . .	7
1.10	Vergleich Referenz und DuT . . . . .	7
1.11	Ausschnitt aus Vergleich (Abbildung 1.10) . . . . .	8
1.12	Vergleich des Nullpunktsignals (DuT und Referenz in Ruhe auf einer Tischfläche liegend) . . . . .	9
1.13	(Fast) Fouriertransformation der Nullpunktsignale . . . . .	9

2.1	Lastverlauf . . . . .	11
2.2	DuT 70 Hz vor Verguss und Abgleich . . . . .	12
2.3	FFT 70 Hz Rauschen NP . . . . .	13
2.4	FFT 100Hz Rauschen Np . . . . .	13
2.5	FFT Vergleich . . . . .	14
2.6	Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 10min (600s) . . . . .	15
2.7	Nullpunkt-Verlauf 70Hz über 10min (600s) . . . . .	15
2.8	Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 200s (Ausschnitt aus obigem Bild) . . . . .	16
2.9	Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 200s (Ausschnitt aus obigem Bild) . . . . .	16
3.1	40 Hz (unvergossen) vs 100 Hz (vergossen) bei vergleichbarer Belastung . . . . .	18
3.2	Ausschnitt aus Abb. 3.1; Sensoren unbelastet . . . . .	19
3.3	Wiederholung der ersten Messung . . . . .	19
3.4	Ausschnitt aus Abb. 3.3; Sensoren unbelastet . . . . .	20
3.5	Langzeitbetrachtung Nullpunkt . . . . .	20
3.6	Ausschnitt aus Abb. 3.5: Periodische Sprünge in NP-Signal . . . . .	21
3.7	2. Langzeitbetrachtung Nullpunkt (Sensoren warmgelaufen) . . . . .	21
3.8	Ausschnitt aus Abb. 3.7: Periodische Sprünge in NP-Signal . . . . .	22
3.9	40 Hz (unvergossen) vs 100 Hz (vergossen) bei vergleichbarer Belastung; beide Sensoren "warmgelaufen" . . . . .	23
3.10	Langzeitbetrachtung Nullpunkt DuTs 500 Hz und 20 Hz . . . . .	24
3.11	Ausschnitt aus Abb. 3.10 . . . . .	24
3.12	500 Hz (Unvergossen) vs 20 Hz (unvergossen) bei vergleichbarer Belastung . . . . .	25
3.13	Spektralbetrachtung aller DuTs . . . . .	26

# Tabellenverzeichnis

1.1	Messparameter . . . . .	2
1.2	Getestete DuTs . . . . .	2

# 1. Erste Messkampagne vom 21.07.23

## 1.1 Versuchsaufbau

Um den Einfluss der Filtermodifikation zu untersuchen, wurden 3 Sensoren mit modifiziertem Print gefertigt. Die Printmodifikation betrifft die Eckfrequenz des Tiefpassfilters. Hierfür wurde je ein Print mit Eckfrequenz 70Hz, 100Hz sowie 500Hz gefertigt. Als Referenz wurde ein weiterer Sensor ohne Printmodifikation (Auslieferungszustand Muster Sumitomo) gefertigt.

Die Sensoren wurden nicht abgeglichen, weshalb im Folgenden die Sensorwerte auf das jeweilige Maximum der Messungen normiert wurden.

Um messtechnisch den Einfluss der Filtermodifikation zu validieren, wurden jeweils ein Sensor mit Modifikation (Device under Test, DuT) sowie der nicht-modifizierte Sensor "Rücken an Rücken" gestellt. Während der Messung wurde das Nullpunktsignal für einige Sekunden aufgezeichnet, wobei die Sensoren auf einem Tisch liegen gelassen wurden. Anschliessend wurden die Sensoren jeweils Steckerseitig aneinandergepresst, womit beide Sensoren (DuT und Referenz) jeweils etwa die gleiche Dehnung erfahren sollten.

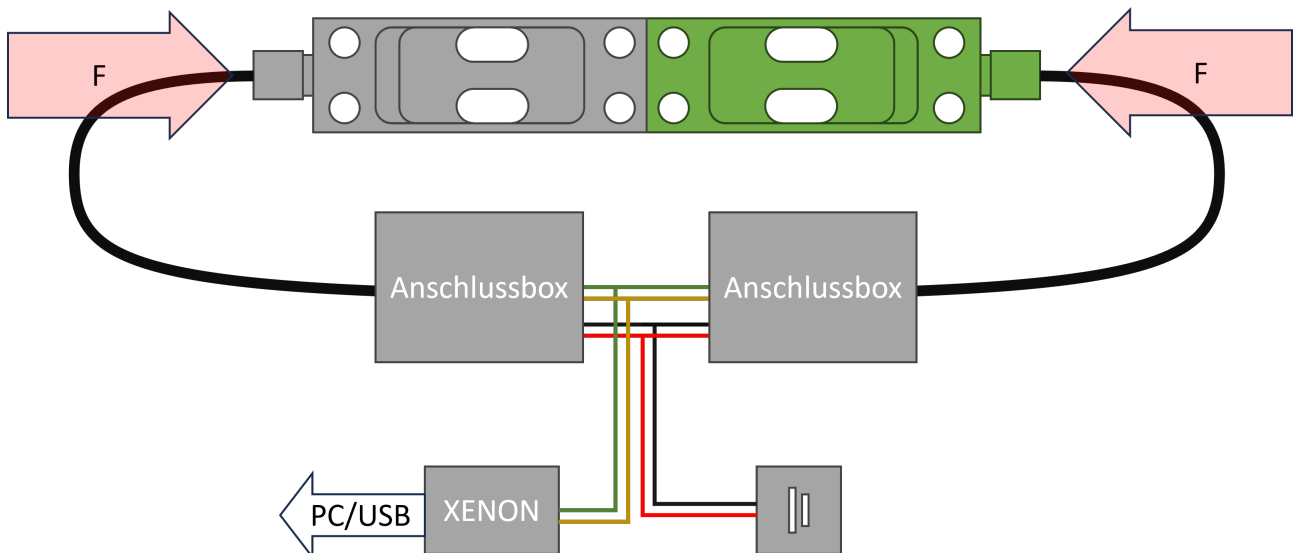


Abbildung 1.1: Versuchsaufbau; grün: DuT, grau: Referenz

Die Sensoren wurden mit einem Labornetzteil mit 24 V gespeist, zur Datenerfassung wurde das USB-Interface mit XENON eingesetzt. Die Parameter sind in Tabelle 1.2 aufgelistet. Der Referenz-Sensor ist für alle Messungen auf CH0, das DuT auf CH1.

Tabelle 1.1: Messparameter

Abtastfrequenz	2000 Hz
Speisung	24 V
Messdauer	$\sim 60$ s

Tabelle 1.2: Getestete DuTs

#DuT	Eckfrequenz $f_c$ [Hz]
DuT 1	70
DuT 2	100
DuT 3	500

## 1.2 Resultate & Diskussion

### 1.2.1 Modifikation 70 Hz

Abbildung 1.2 zeigt den Signalverlauf des Referenzsensors. Das DuT und die Referenz wurden zu erst zweimal schlagartig und anschliessend rampenartig belastet. Die schlagartige Belastung resultiert in "Spikes", welche unmittelbar zu Beginn des Signalanstiegs zu erkennen sind.

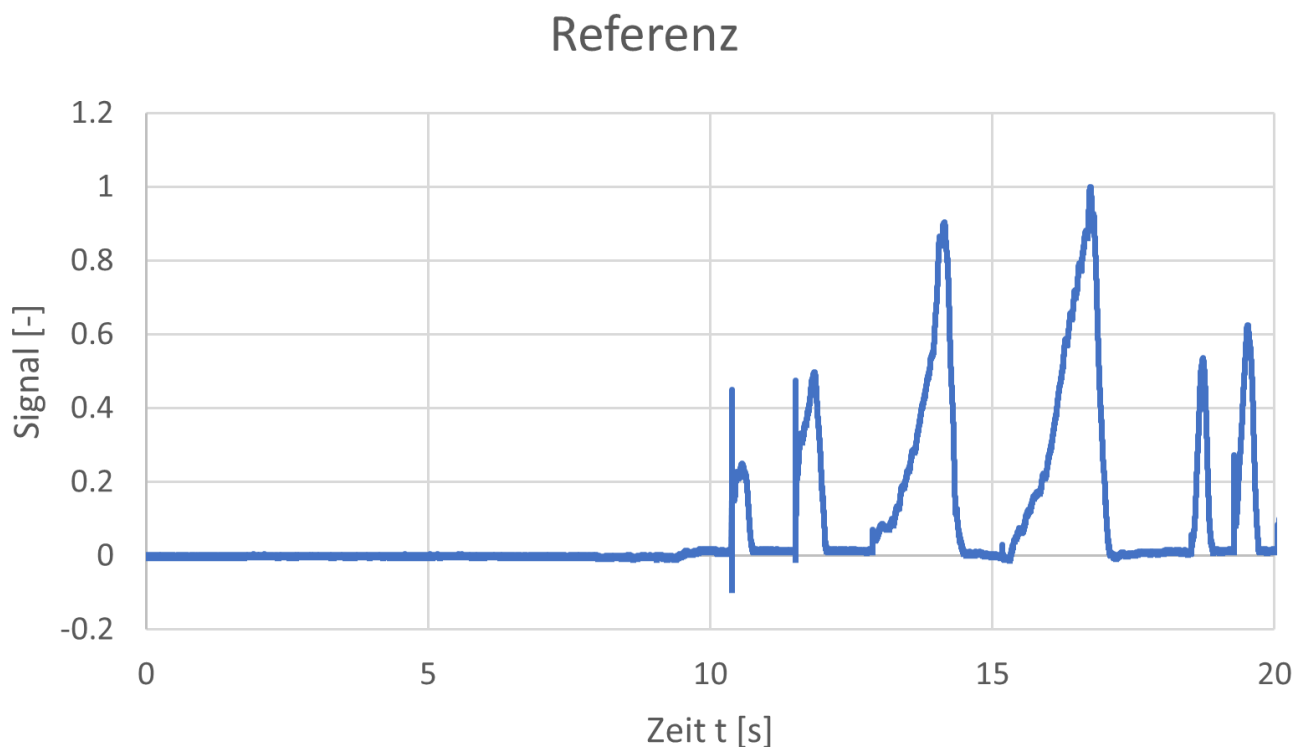


Abbildung 1.2: Signalverlauf Referenzsensor

Die Abbildung 1.3 zeigt den zu Abbildung 1.2 simultanen Signalverlauf des DuT. Aufgrund des modifizierten Filters sind hier keine Spikes auszumachen.

### DuT 70Hz

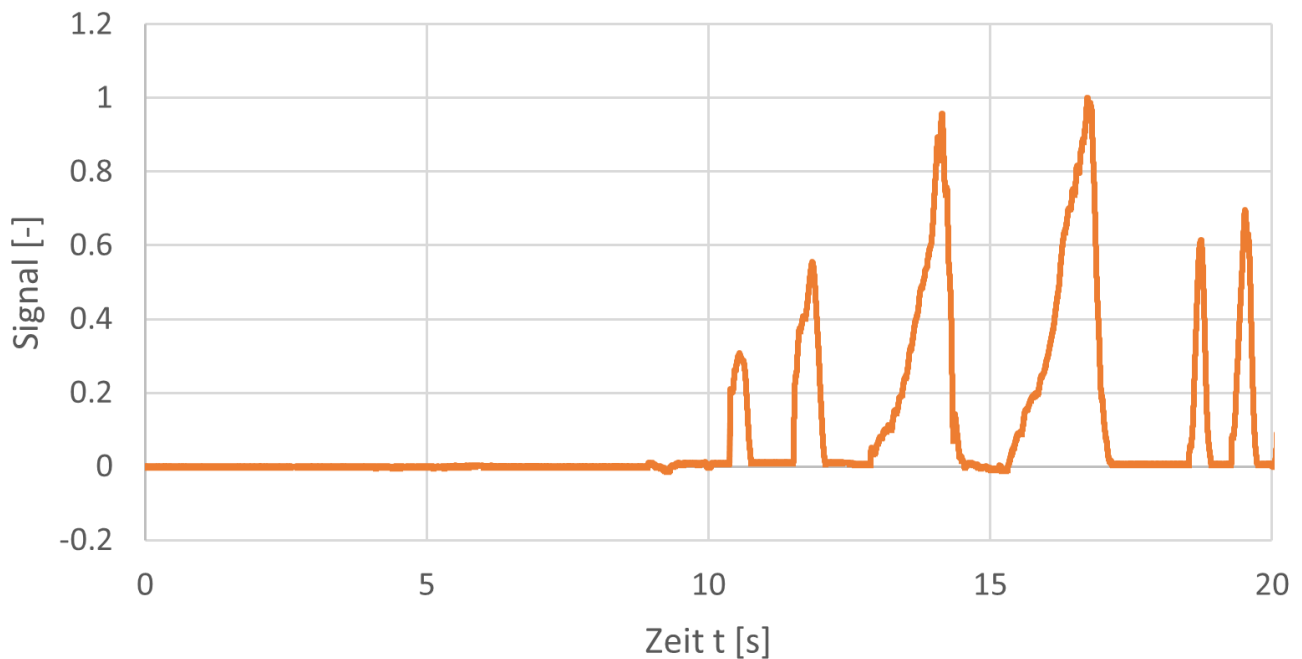


Abbildung 1.3: Signalverlauf DuT

### Referenz vs DuT 70Hz

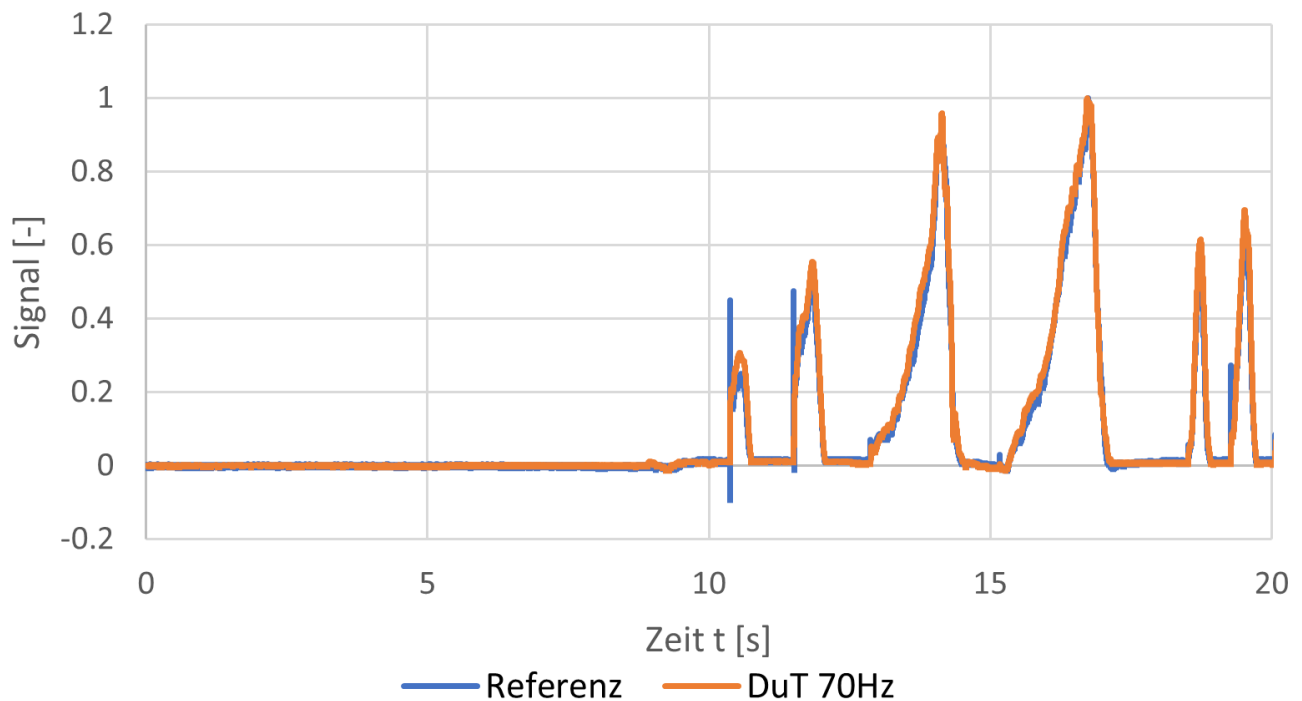


Abbildung 1.4: Vergleich Referenz und DuT

Die Abbildung 1.5 zeigt weiter, dass der Signalverlauf des DuT insgesamt glatter ist als jener der Referenz.

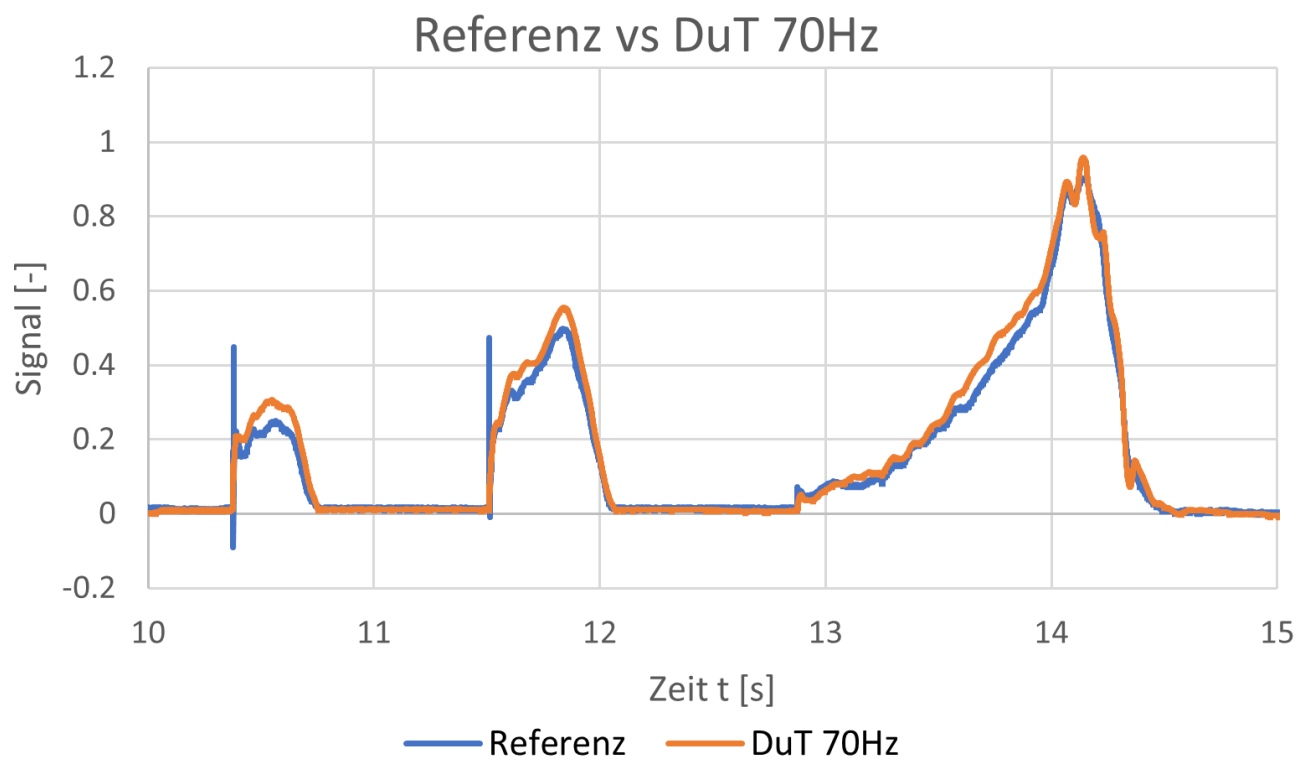


Abbildung 1.5: Ausschnitt aus Vergleich (Abbildung 1.4)

Das Band des Rauschens auf dem Ruhesignal fällt beim DuT wesentlich schmäler aus als bei der Referenz wie in Abbildung 1.6 zu erkennen ist.

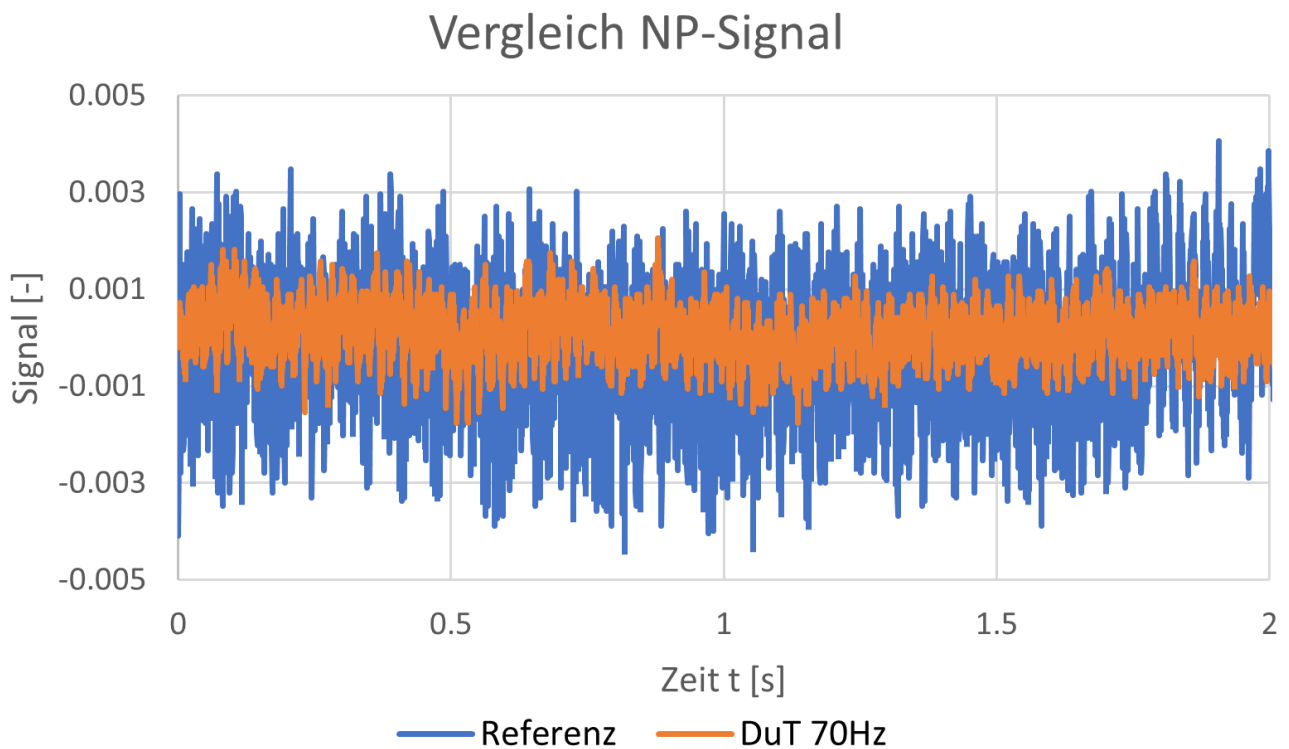


Abbildung 1.6: Vergleich des Nullpunktsignals (DuT und Referenz in Ruhe auf einer Tischfläche liegend)

Die Fourieranalyse bestätigt vorherige Resultate punkto Rauschverhalten. Im Spektrum des DuT-Signals werden höhere Frequenzen deutlich gedämpft. Es fällt jedoch auf, dass rund alle 250Hz markante Spikes vorhanden sind.

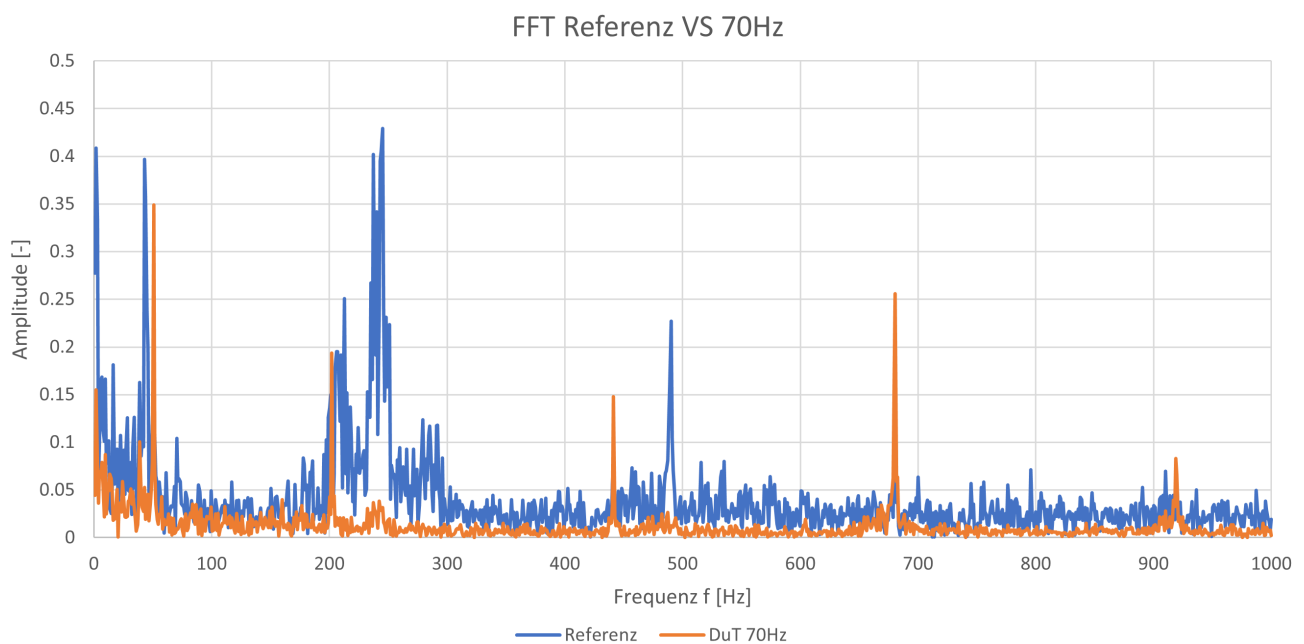


Abbildung 1.7: (Fast) Fouriertransformation der Nullpunktsignale



### 1.2.2 Modifikation 100 Hz

Mit dem zweiten DuT (100Hz) wurden obige Messungen weitestgehend wiederholt. Da die Last / Dehnung nicht automatisiert aufgebracht werden konnte, sieht der Signalverlauf etwas anders aus. Es wurde wieder zu erst einige Sekunden Nullpunktsignal gefolgt von zwei schlagartigen und anschliessend weiteren rampenartigen Belastungen aufgezeichnet. Der Verlauf des Referenzsignals ist der Abbildung 1.8 zu entnehmen. Auch hier sind die schlagartigen Belastungen an den Spikes zu erkennen.

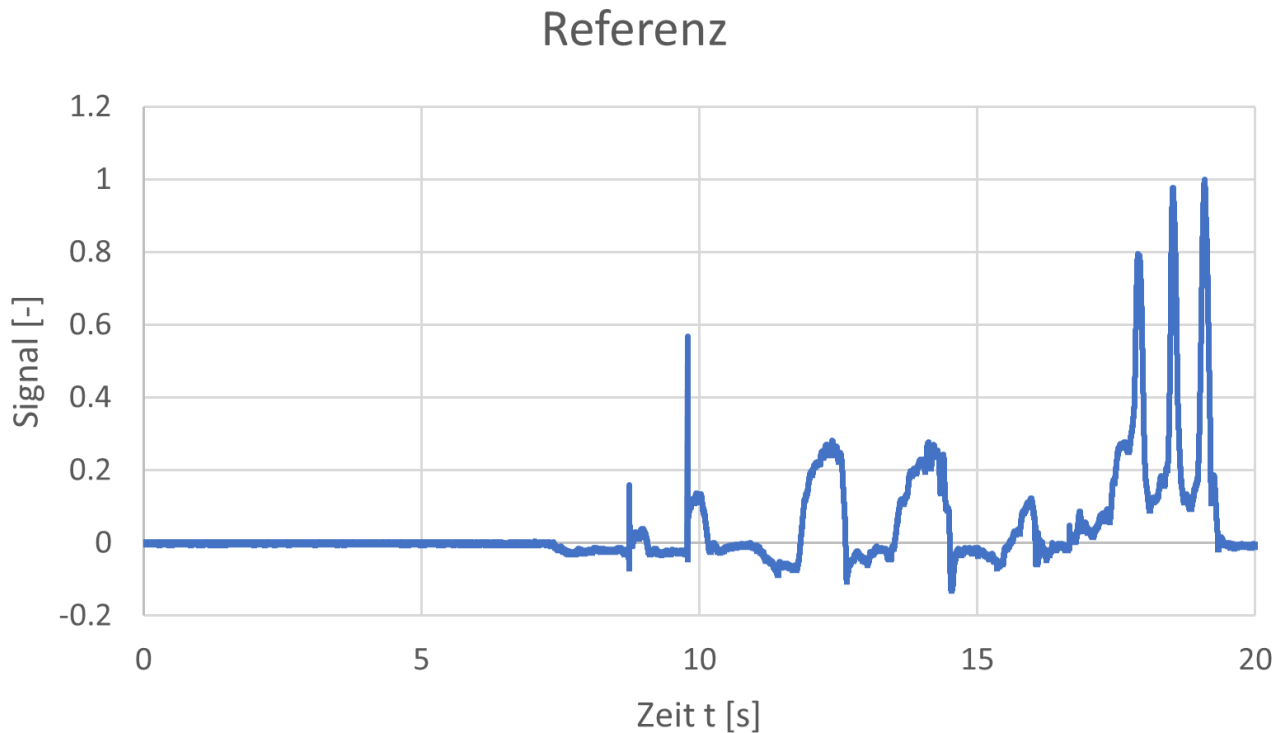


Abbildung 1.8: Signalverlauf Referenzsensor

Wie bereits bei der Modifikation mit Eckfrequenz 70Hz filtert auch das DuT mit Eckfrequenz 100Hz die Spikes mehrheitlich heraus, wie in der untenstehenden Abbildung 1.9 zu erkennen ist.

### DuT 100Hz

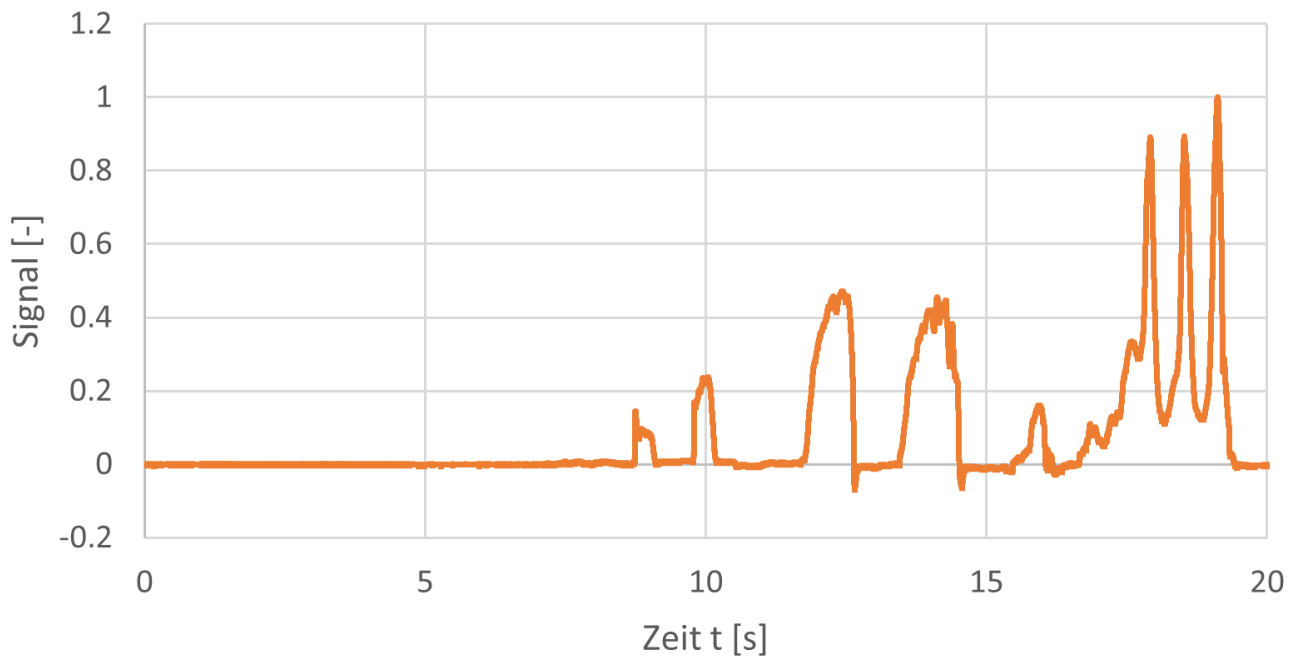


Abbildung 1.9: Signalverlauf DuT

Die beiden Signalverläufe sind in Abbildung 1.10 überlagert. Hier fällt auf, dass die Referenz ein inkonsistentes Nullpunktverhalten aufweist.

### Referenz vs DuT 100Hz

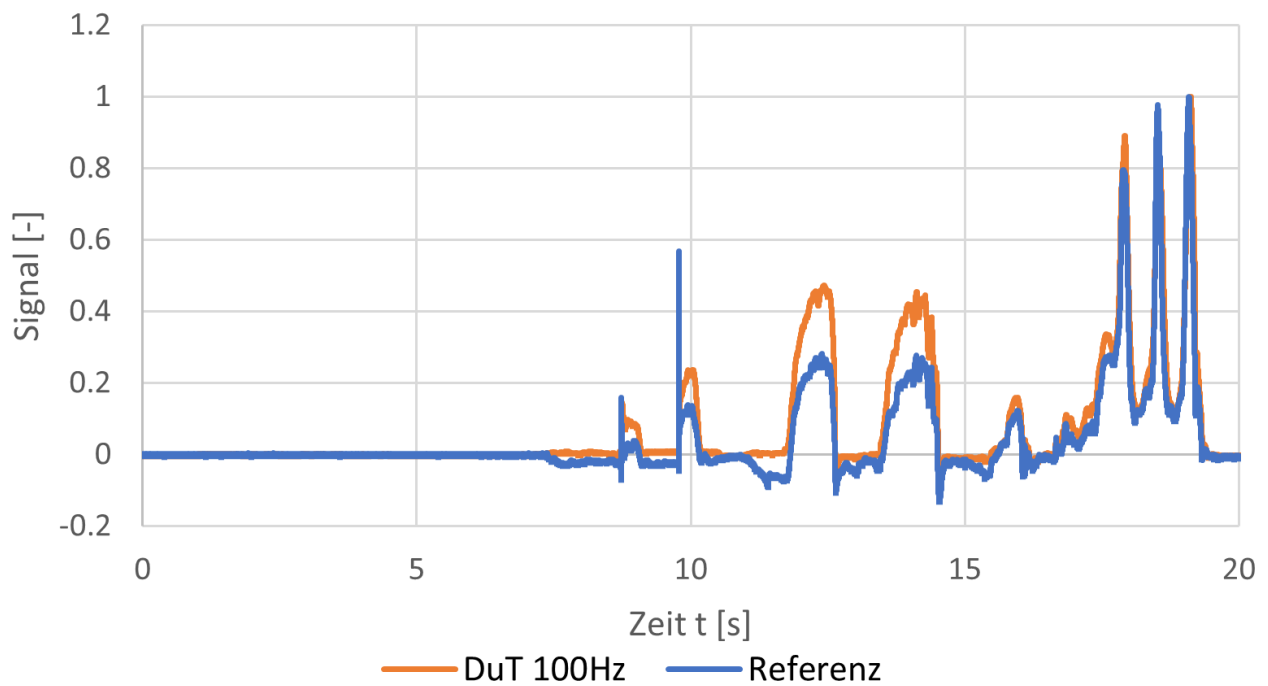


Abbildung 1.10: Vergleich Referenz und DuT

## Untersuchung Rauschverhalten

Um die Unterschiede zwischen DuT und Referenz hervorzuheben, ist in der Abbildung 1.11 ein Ausschnitt aus obigem Diagramm zu sehen. Der Ausschnitt zeigt nochmal die Dämpfung der Spikes sowie das inkonsistente "Return to zero"-Verhalten der Referenz. Weiter kann am Wellenverlauf bei anhaltender Belastung erkannt werden, dass das DuT (orange) einen glatteren Signalverlauf aufweist.

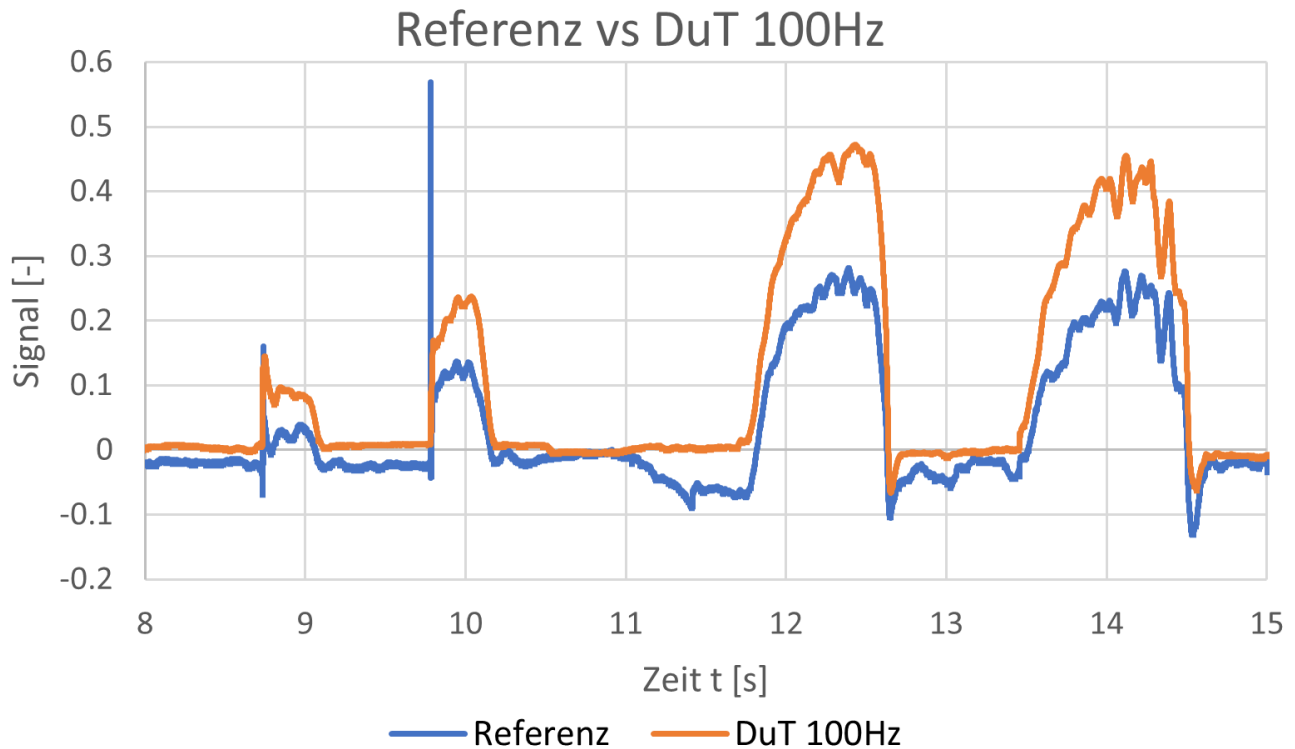


Abbildung 1.11: Ausschnitt aus Vergleich (Abbildung 1.10)

Wie bereits beim DuT mit  $f_c = 70\text{Hz}$  ist auch beim DuT mit  $f_c = 100\text{Hz}$  eine klare Rauschminimierung beim Nullpunktsignal auszumachen.

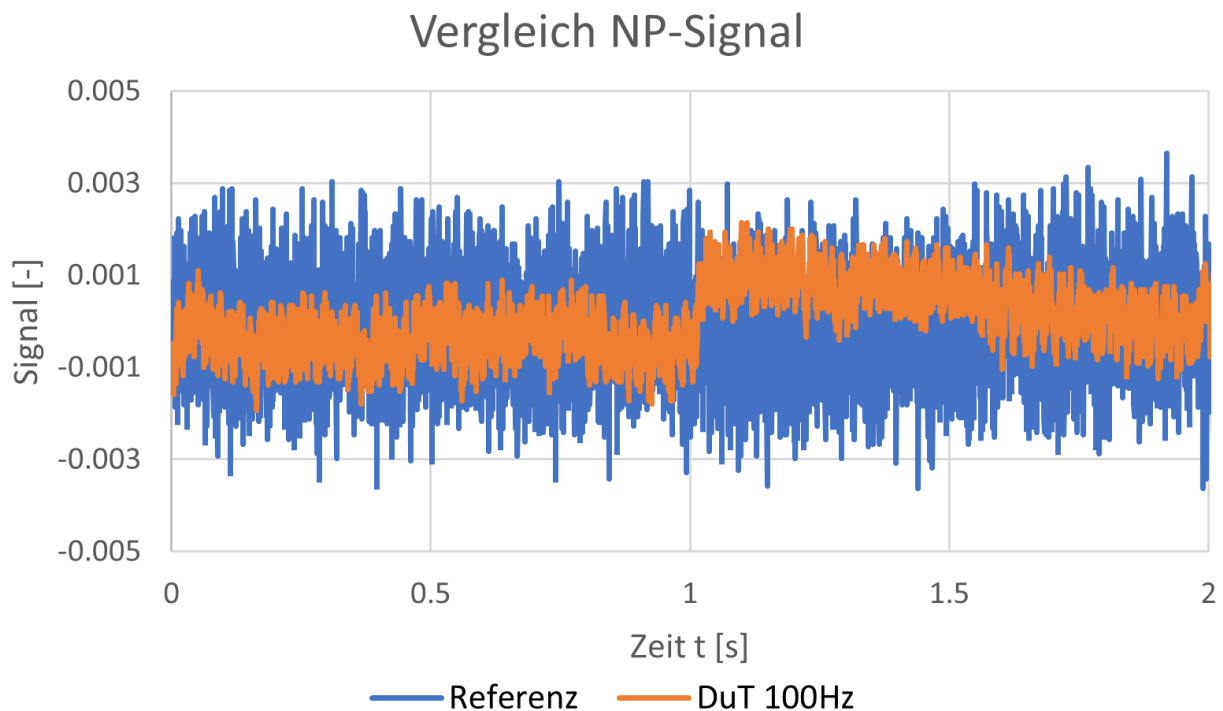


Abbildung 1.12: Vergleich des Nullpunktsignals (DuT und Referenz in Ruhe auf einer Tischfläche liegend)

Die Fourieranalyse bestätigt auch hier die Wirksamkeit des Filters. Wie bereits beim ersten DuT sind auch hier einige periodische Spikes ab 400Hz mit einem Abstand von rund 80Hz auszumachen.

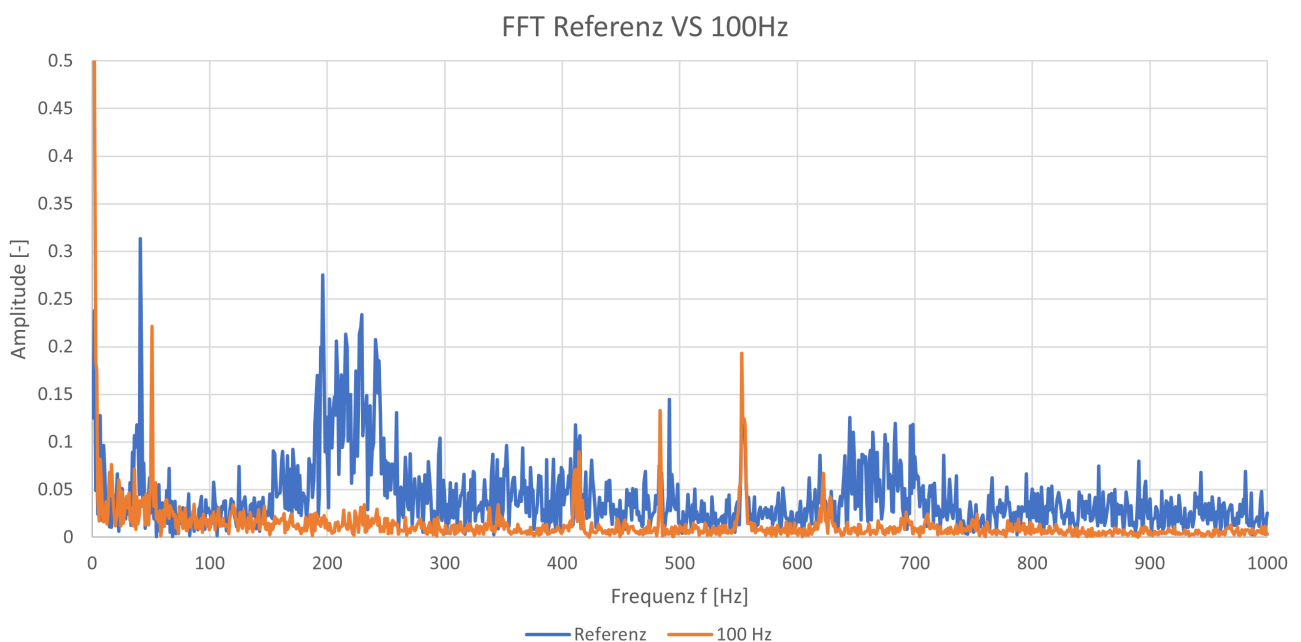


Abbildung 1.13: (Fast) Fouriertransformation der Nullpunktsignale

Die Messungen für das DuT mit  $f_c = 500\text{Hz}$  wurden nicht in der Tiefe ausgewertet, da der

## Untersuchung Rauschverhalten

Nullpunkt ähnlich rauscht wie jener der Referenz (im FFT-Diagramm zu erkennen: Deutliche Amplituden bei  $200 \dots 300 \text{ Hz} < f_c = 500 \text{ Hz}$ )

## 2. Zweite Test Messkampagne vom 06.08.23

### 2.1 Signalverlauf bei Belastungen

Die Messungen aus dem vorangegangenen Bericht vom 24.07.2023 wurden mit den fertigen Sensoren (abgeglichen und vergossen) wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.1 visualisiert

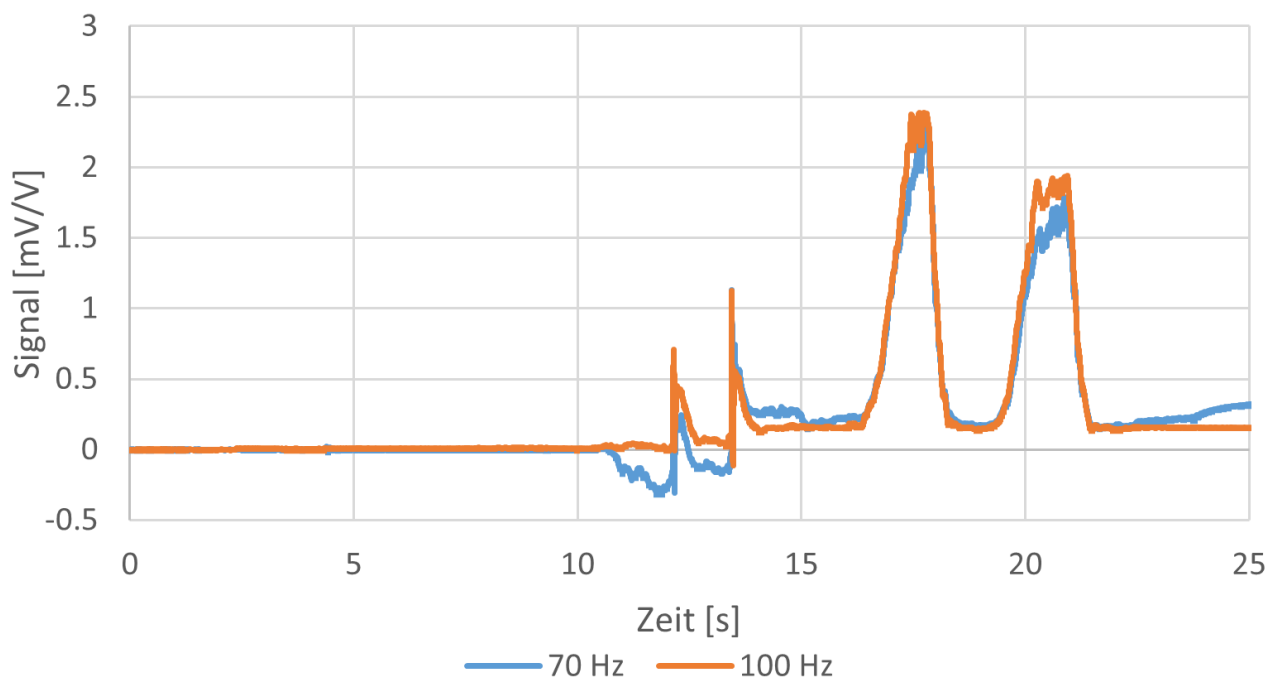


Abbildung 2.1: Lastverlauf

Es fällt auf, dass die Sensoren ab der ersten Belastung (nach rund 10 Sekunden) ein schlechtes Return-to-zero-Verhalten aufweisen. Bereits nach den geringen anfänglichen Belastungen von 0.5 ... 1 mV/V weichen beide Sensoren um rund 0.1 mV/V vom eigentlichen Nullpunkt ab. Dieses Verhalten konnte bei den Messungen vor Abgleich & Verguss nicht festgestellt werden. Das Ergebniss des unvergossenen Sensors mit 100Hz Eckfrequenz ist zum Vergleich in der Abbildung 2.2 nochmal dargestellt.

## DuT 70Hz

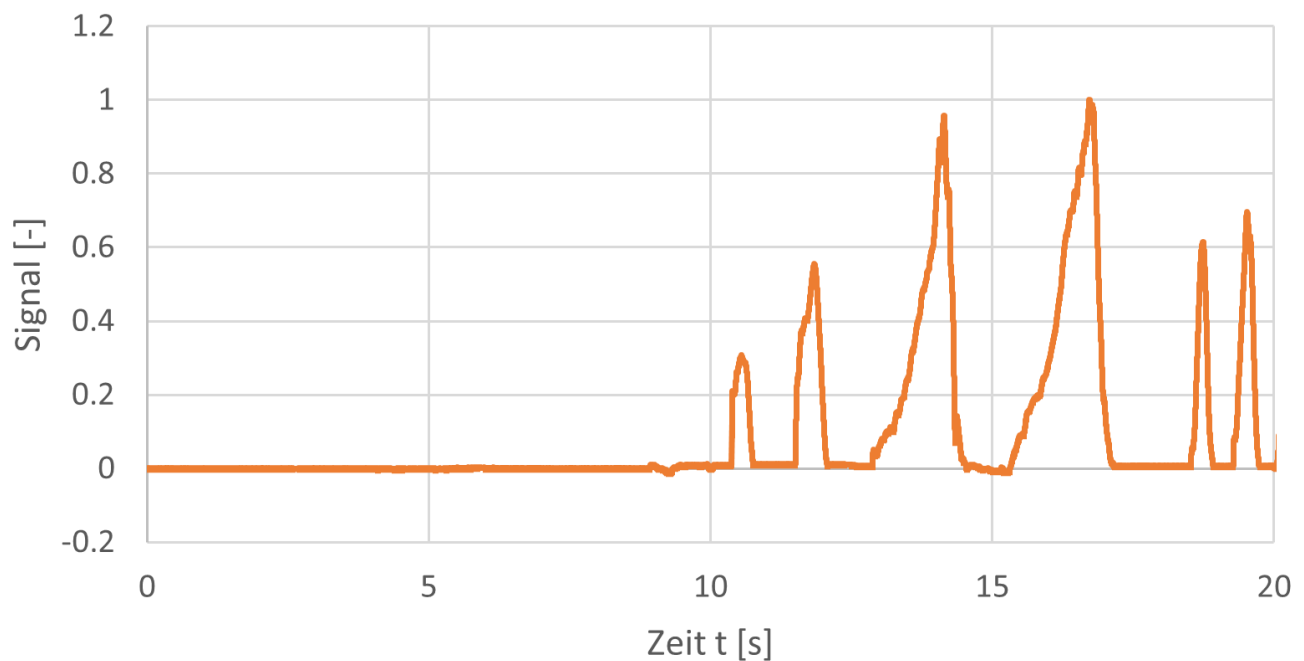


Abbildung 2.2: DuT 70 Hz vor Verguss und Abgleich

## 2.2 Fourier-Analyse NP-Signale

In den folgenden zwei Abbildungen sind die Frequenzspektren der Nullpunktsignal der beiden DuTs visualisiert. In der Abbildung 2.5 sind die Spektren im Vergleich zu sehen.

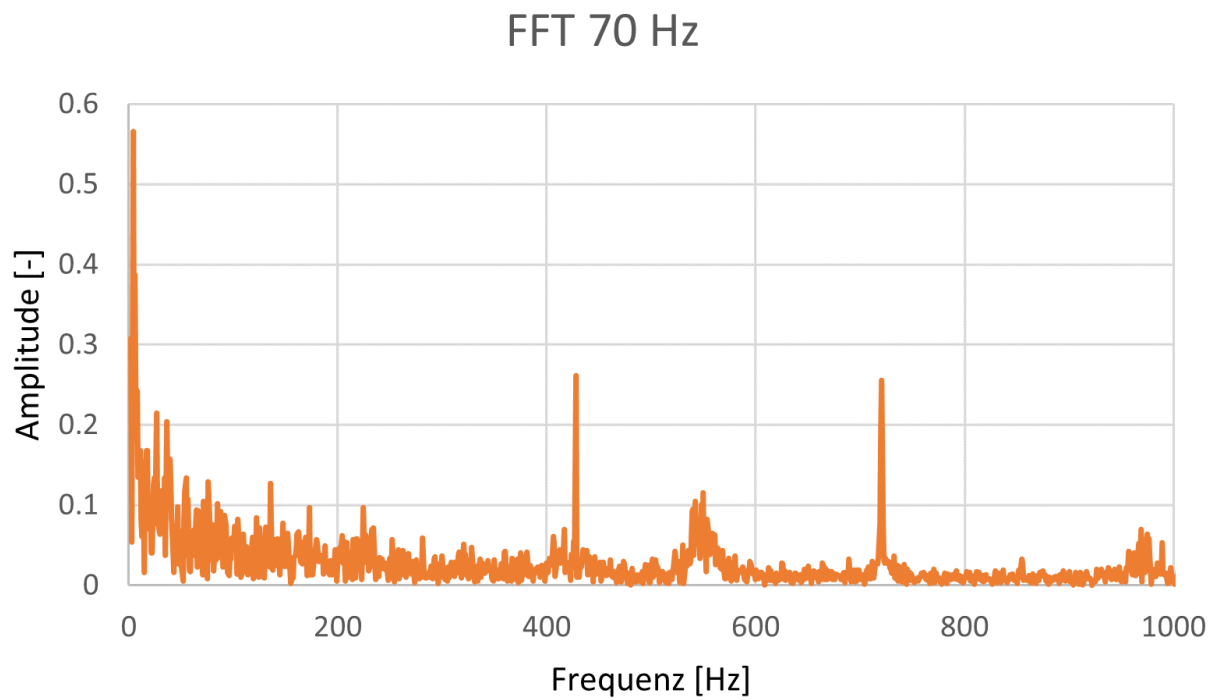


Abbildung 2.3: FFT 70 Hz Rauschen NP

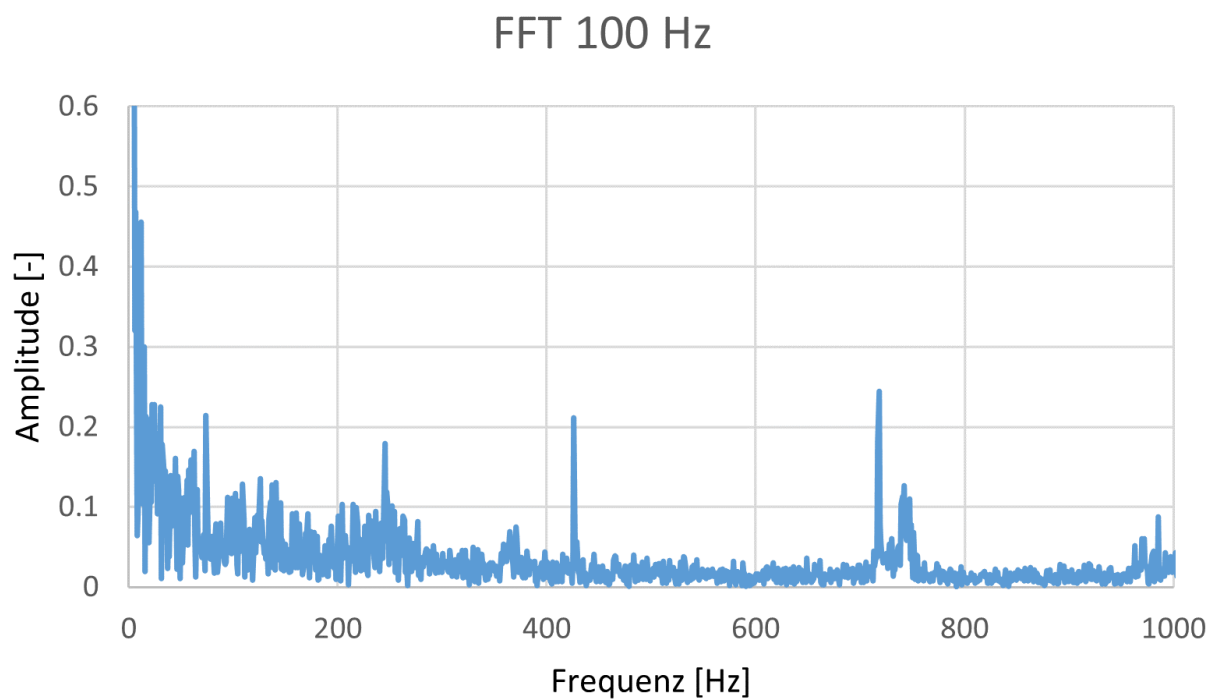


Abbildung 2.4: FFT 100Hz Rauschen Np



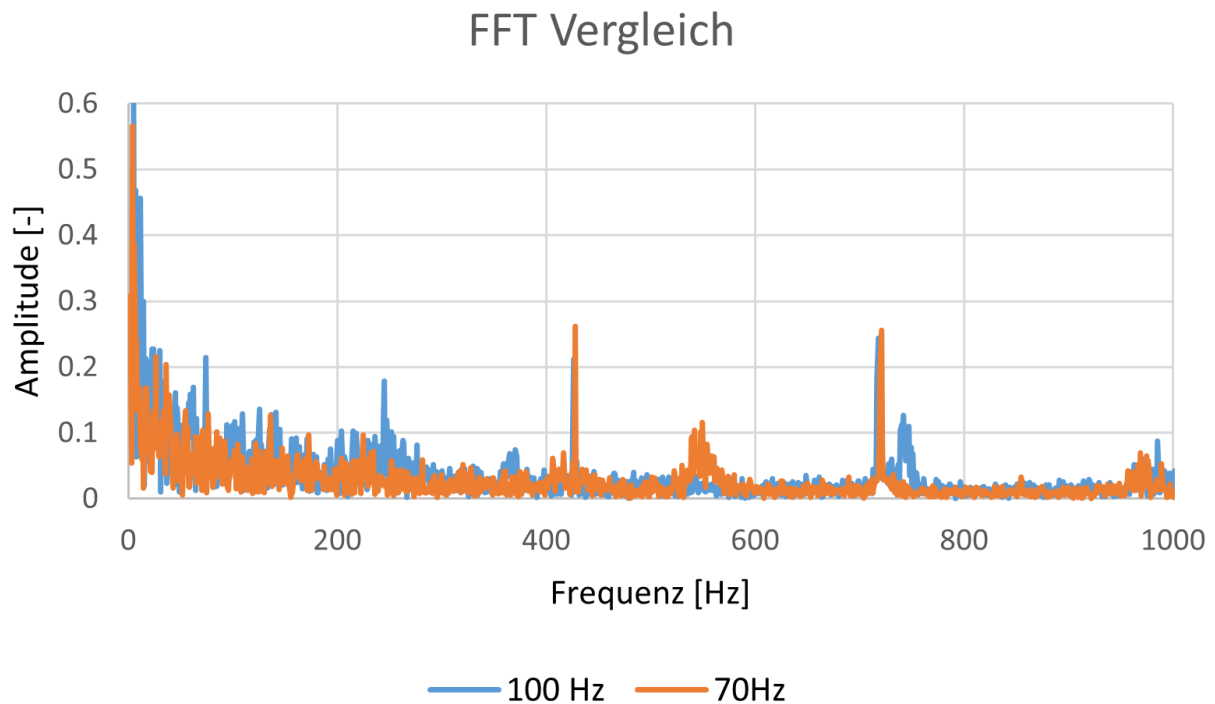


Abbildung 2.5: FFT Vergleich

Die Gegenüberstellung zeigt, dass das DuT mit Eckfrequenz 70 Hz im Allgemeinen alle Frequenzanteile über 70 Hz stärker dämpft als jenes mit Eckfrequenz 100 Hz und erfüllt somit die Erwartungen. Auffallend ist jedoch, dass beide DuTs klare Peaks bei rund 440 und 720 Hz aufweisen.

## 2.3 Langzeitbetrachtung Nullpunkt

Aufgrund von Feedback aus der Fertigung bezüglich instablen Nullpunkten sowie Beobachtungen aus Abbildung 2.1 wurde der Nullpunkt der DuTs zusätzlich über einen Zeitraum von 10 Minuten aufgezeichnet. Die Messungen sind den Abbildung 2.6 und 2.7 zu entnehmen. Beide DuTs weisen einen deutlichen Nullpunktdrift von  $\Delta S_{NP,100Hz} \approx 2^{mV}/V$  respektive  $\Delta S_{NP,70Hz} \approx 1^{mV}/V$  auf

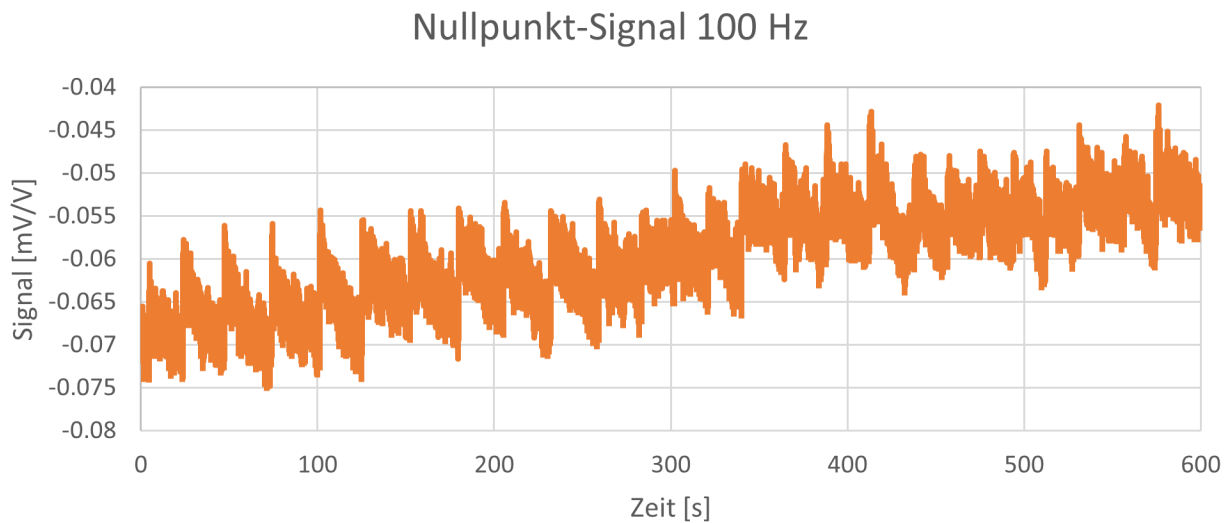


Abbildung 2.6: Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 10min (600s)

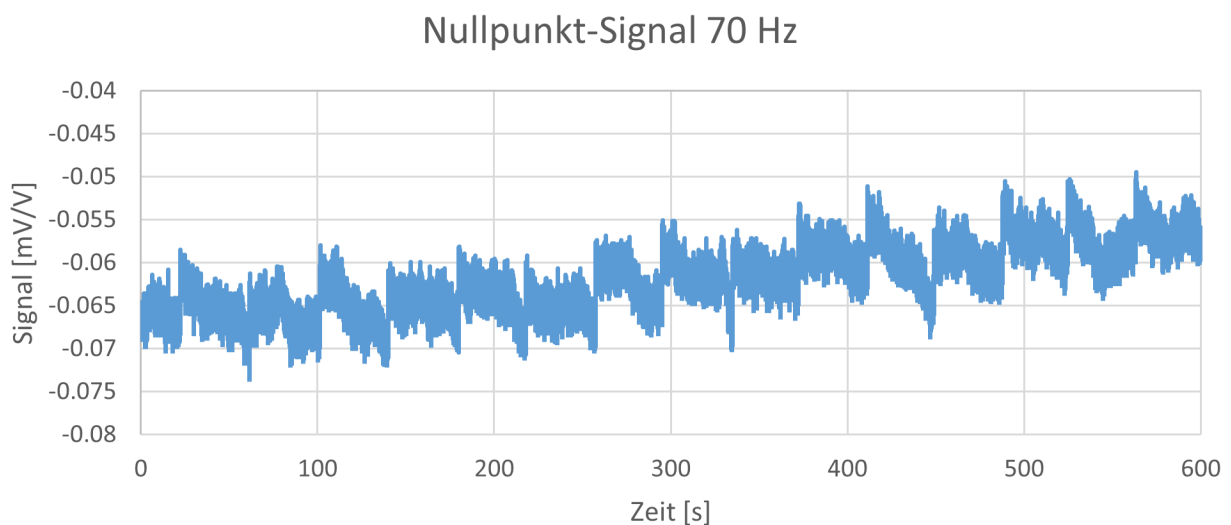


Abbildung 2.7: Nullpunkt-Verlauf 70Hz über 10min (600s)

Weiter zeigen die beiden obigen Messungen, dass der Nullpunkt periodisch springt. Dieser Effekt ist für den Zeitraum von 200 Sekunden (ab Sekunde 100) der obigen Messungen untenstehend nochmal dargestellt. Aus diesen Abbildungen kann eine Periodizität von  $T_{NP,100Hz} \approx 25s$  sowie  $T_{NP,70Hz} \approx 40s$  ermittelt werden. Innerhalb dieser Perioden fällt der Nullpunkt jeweils um rund  $0.01mV/V$  ab, wobei das Signal über längere Zeiträume aufgrund der Sprünge insgesamt leicht steigt.

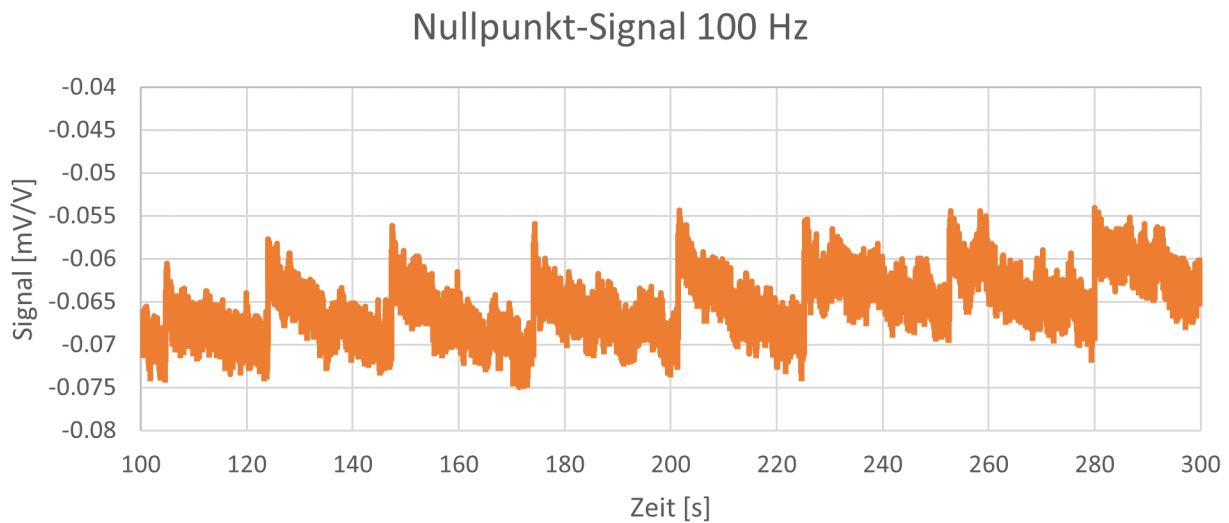


Abbildung 2.8: Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 200s (Ausschnitt aus obigem Bild)

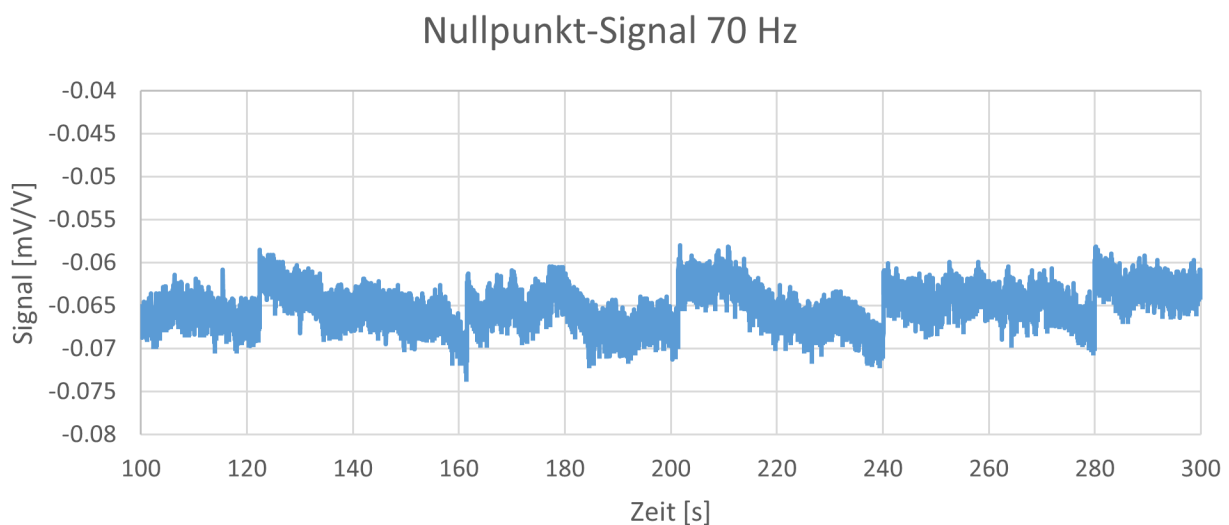


Abbildung 2.9: Nullpunkt-Verlauf 100Hz über 200s (Ausschnitt aus obigem Bild)

## 2.4 Empfehlungen weiteres Vorgehen

Um einen Messfehler auszuschließen, sollte die Messung allenfalls rasch reproduziert werden. Für diese Messungen wurde das Mess-Setup einige Stunden vor der eigentlichen Messung aufgebaut. Die DuTs wurden permanent gespiesen und waren zum Zeitpunkt der Messung deutlich erwärmt. Im Falle einer Messwiederholung sollte daher gleich zu Beginn eine Messung durchgeführt werden (wenn die Sensorik / Elektronik noch kalt ist) und diese Messung dann nach einigen Stunden wiederholt werden. Aus diesem Ansatz könnten Erkenntnissen zum Aufwärmverhalten gewonnen werden. Weiter sollte die Software, welche auf den X-106-Prints läuft,

## Untersuchung Rauschverhalten

überprüft werden. Eventuell kommt das periodische Springen der Nullpunkte auf der digitalen Seite des Signalprocessings zu Stande.

### 3. Dritte Messkampagne vom 10.08.23

#### 3.1 Vergleich DuT 100Hz (vergossen) vs DuT 40Hz (unvergossen)

In einer ersten Messung wurden die DuTs erneut "Rücken an Rücken" belastet, sodass beide Sensoren etwa die selbe Dehnung erfahren. Die Resultate in Abb. 3.1 zeigen, dass die Sensoren vergleichbare Signale liefern, das Nullpunktverhalten des DuTs mit Eckfrequenz 100Hz aber stabiler erscheint.

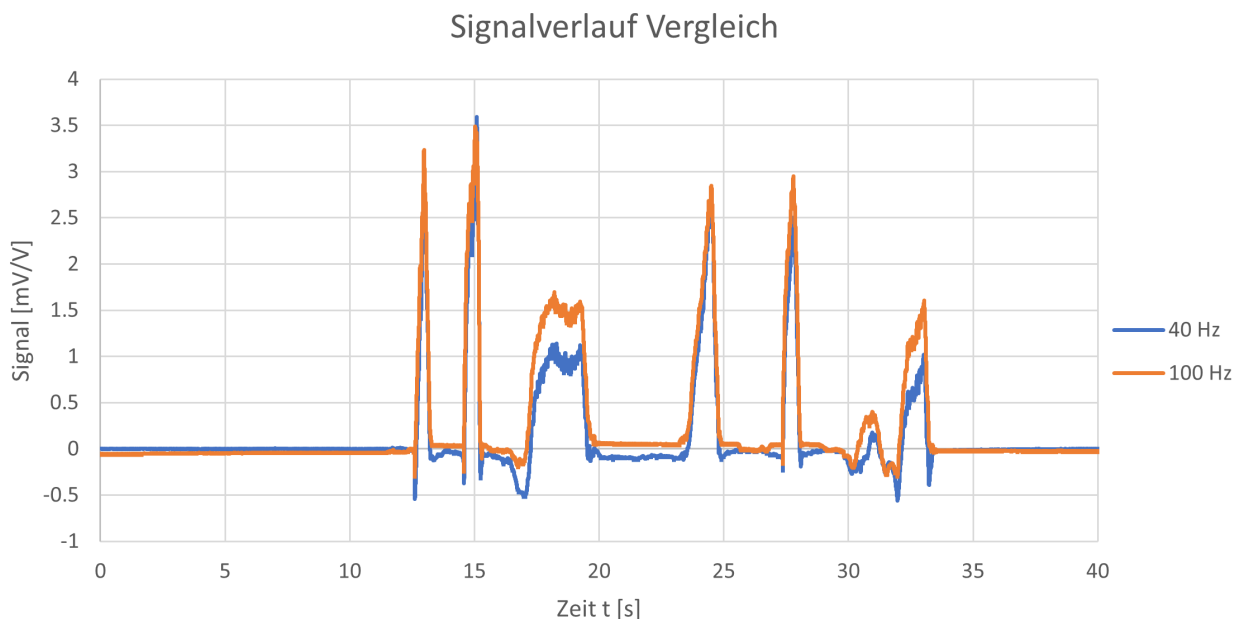


Abbildung 3.1: 40 Hz (unvergossen) vs 100 Hz (vergossen) bei vergleichbarer Belastung

In der Abbildung 3.2 wird die unbelastete Phase (0...10 s) aus obiger Abbildung genauer betrachtet. Es ist zu erkennen, dass in diesem Ausschnitt das DuT mit Eckfrequenz 40Hz stabiler ist; das andere DuT zeigt einen Nullpunkt-Drift von  $\sim 20\mu\varepsilon$ , was bei einem FS von  $2^{mV}/V$  rund 1% entspricht.

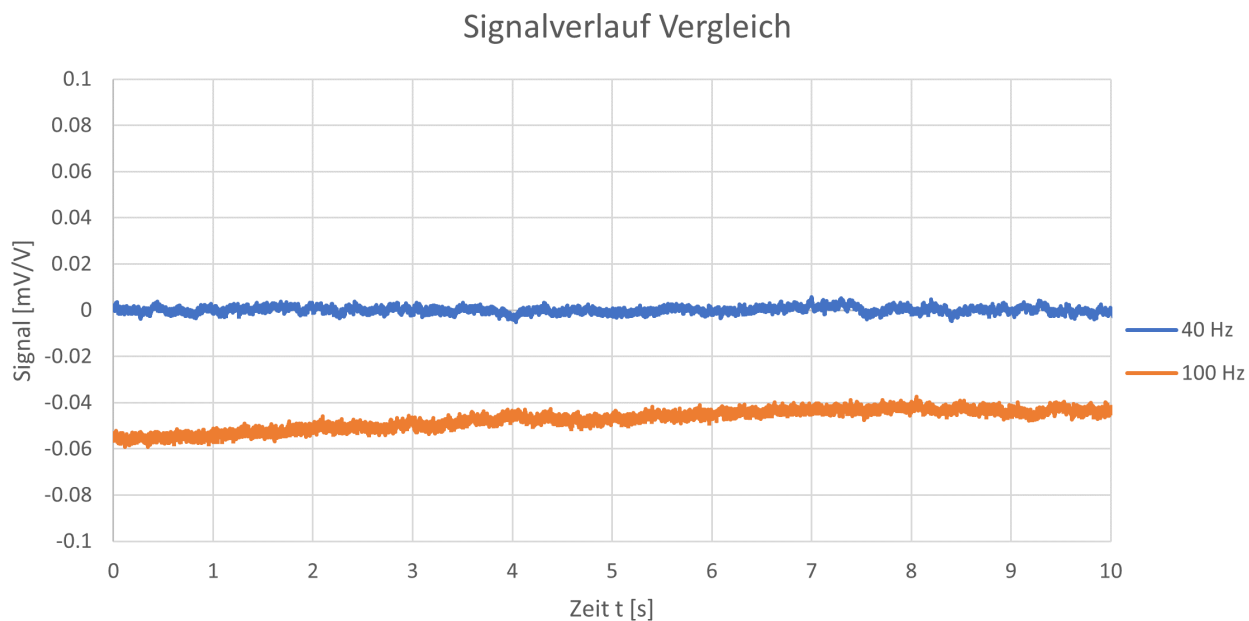


Abbildung 3.2: Ausschnitt aus Abb. 3.1; Sensoren unbelastet

Obige Messung wurde ein zweites Mal zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Phänomene durchgeführt. Die Beobachtungen wurden bestätigt.

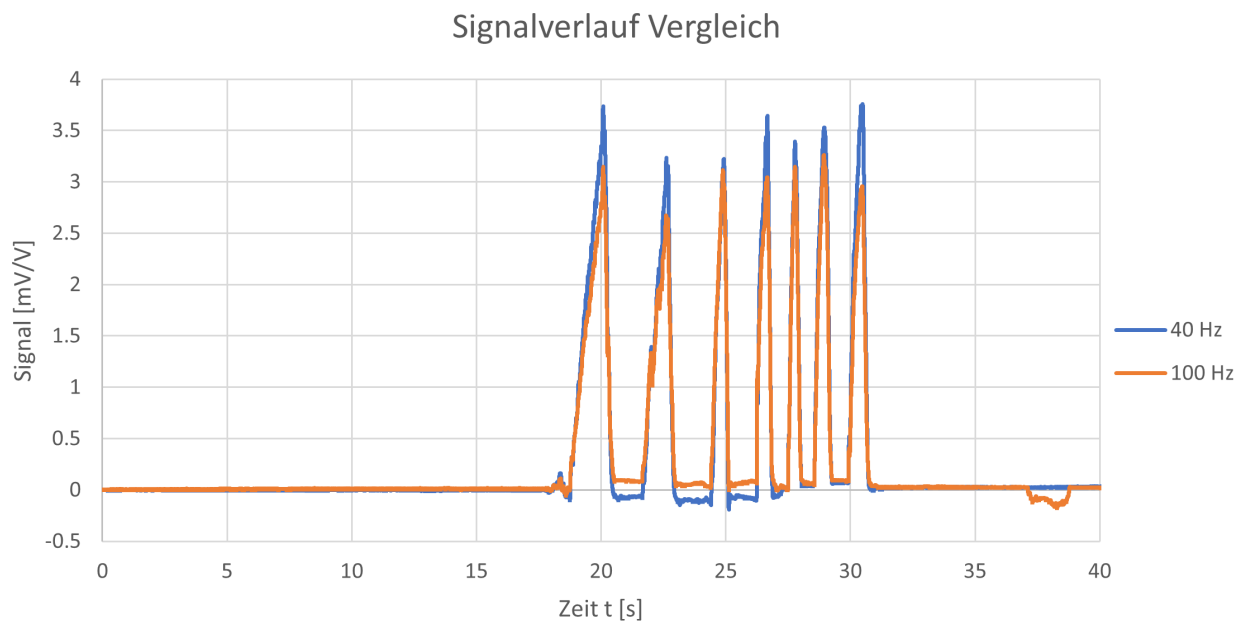


Abbildung 3.3: Wiederholung der ersten Messung

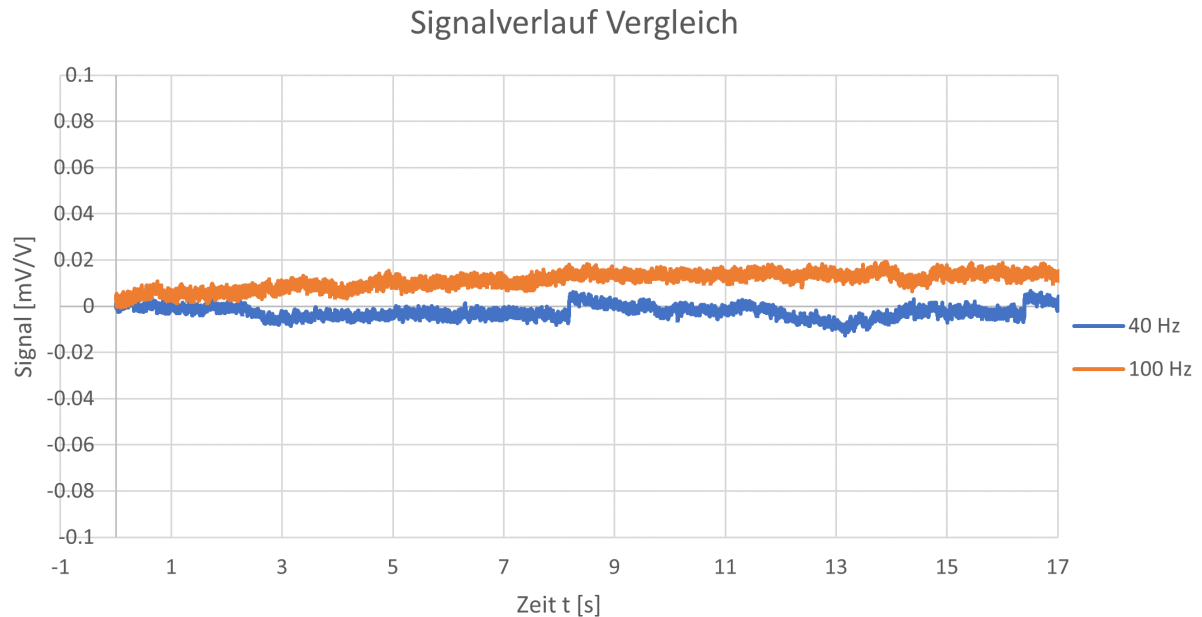


Abbildung 3.4: Ausschnitt aus Abb. 3.3; Sensoren unbelastet

Um die Entwicklung der Nullpunktsignals über einen grösseren Zeitraum zu beobachten, wurden die Sensoren über eine Zeitspanne von 30min in unbelastetem Zustand ausgemessen. Die Sensoren sind noch nahezu "kalt".

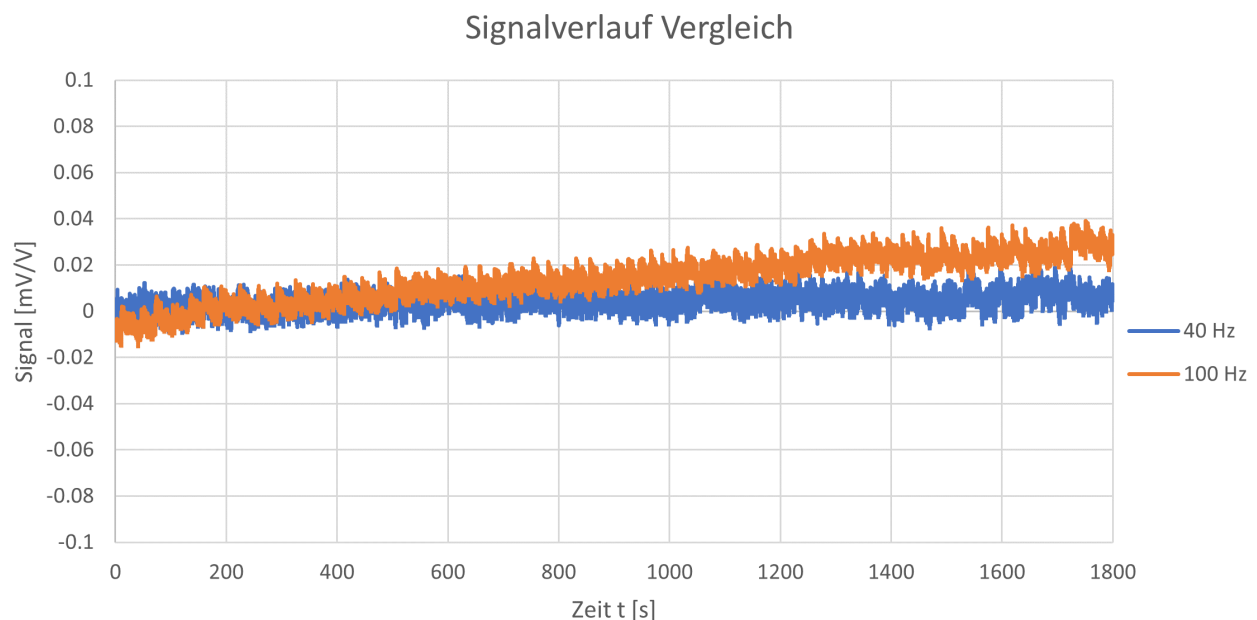


Abbildung 3.5: Langzeitbetrachtung Nullpunkt

Man erkennt einen deutlichen Drift des Nullpunkts des DuT mit EF 100Hz. Dieser driftet um weitere  $\sim 30\mu\epsilon$ , was weiteren 1.5% FS entspricht.

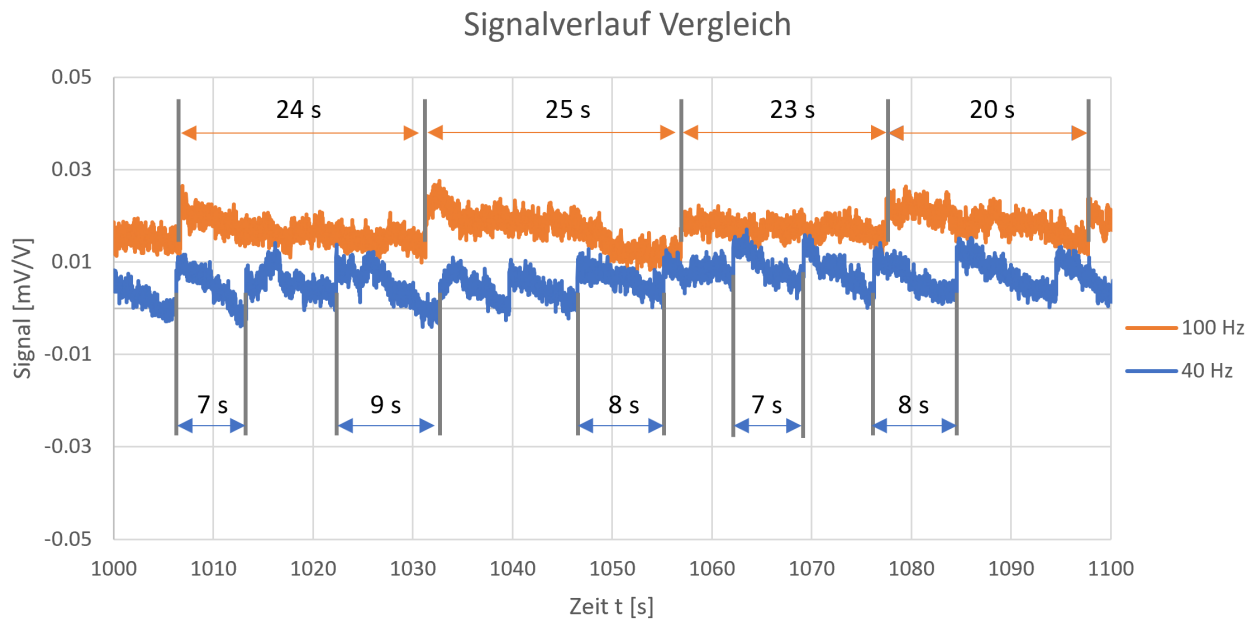


Abbildung 3.6: Ausschnitt aus Abb. 3.5: Periodische Sprünge in NP-Signal

Wird nun ein Ausschnitt aus obigem Diagramm genauer betrachtet, kann auch hier wieder ein periodisches sprunghaftes Verhalten der Nullpunkte festgestellt werden. Die Periode des DuTs mit EF 40Hz ist wesentlich kürzer als jene des DuTs mit EF 100Hz.

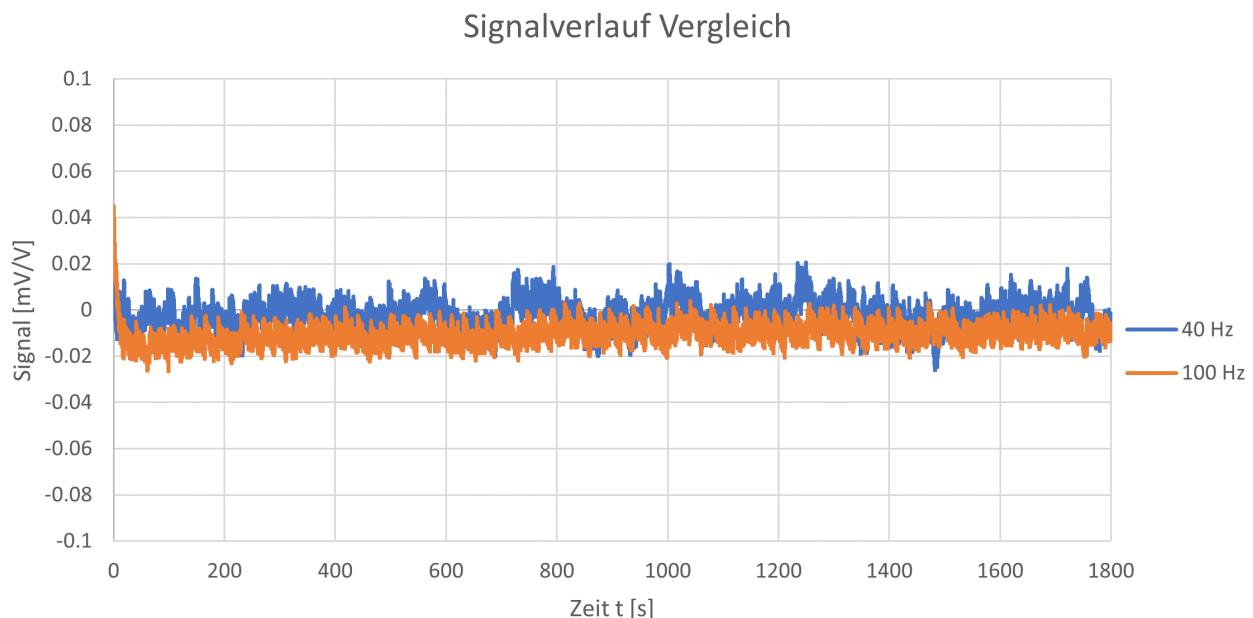


Abbildung 3.7: 2. Langzeitbetrachtung Nullpunkt (Sensoren warmgelaufen)

Obige Messung wurde nach rund 1h wiederholt. Die Sensoren wurden durchgehend bestromt und sind zum Start dieser Messung deutlich wärmer als zu Beginn.



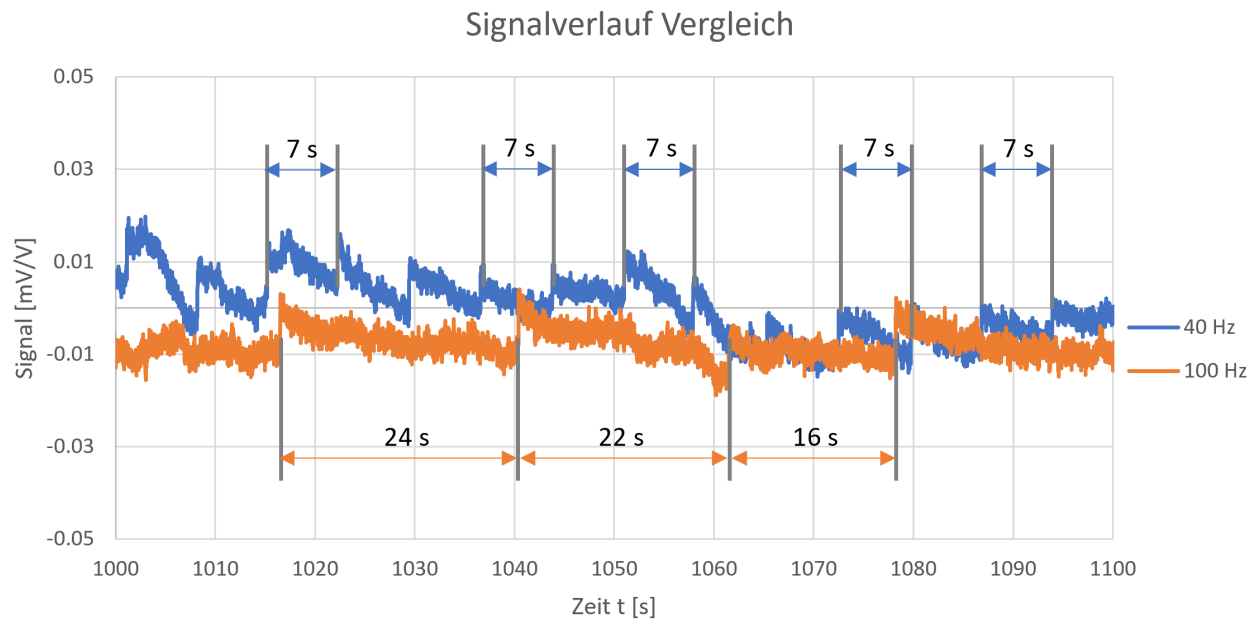


Abbildung 3.8: Ausschnitt aus Abb. 3.7: Periodische Sprünge in NP-Signal

Insgesamt kann keine merkliche Veränderung gegenüber der Messung im "kalten" Zustand festgestellt werden. Es ist jedoch zu beobachten, dass der Nullpunkt des DuTs mit EF 100Hz gleich zu Beginn der Messung abfällt. Bei der ersten Messung konnte ein klarer Trend für eine Zunahme des NP-Signals festgestellt werden. Auch über den Zeitraum von weiteren 30min scheint der NP nun bei beiden DuTs stabil zu sein. Das sprunghafte Verhalten kann aber weiterhin beobachtet werden, wie der Ausschnitt in 3.8 zeigt.

Zum Schnuss wurde die aller erste Messung nochmal wiederholt, um Temperatureinflüsse (beide Sensoren nun in steady state, Temperatur "Handwarm") zu untersuchen. Die Charakteristik der Verläufe blieb aber unverändert, wie der Abbildung 3.9 zu entnehmen ist.

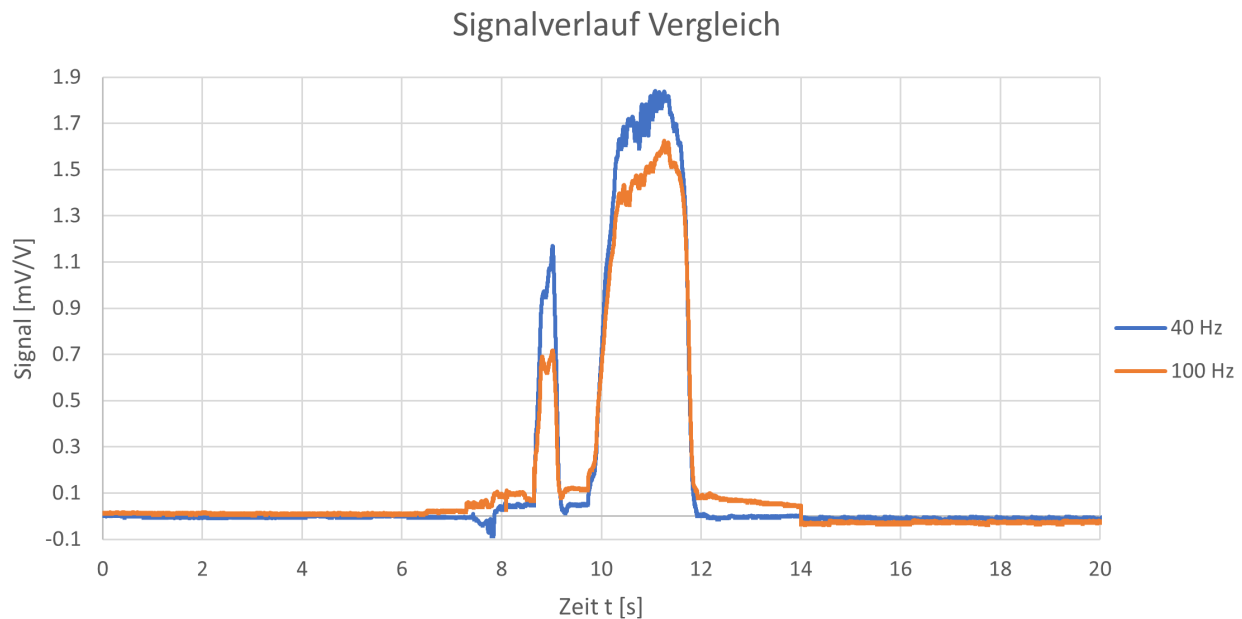


Abbildung 3.9: 40 Hz (unvergossen) vs 100 Hz (vergossen) bei vergleichbarer Belastung; beide Sensoren "warmgelaufen"

### 3.2 Vergleich DuT 500Hz (unvergossen) vs DuT 20Hz (unvergossen)

Die beiden Messungen (Langzeit-NP-Betrachtung, "Rücken an Rücken"-Belastung) wurde mit den DuTs mit EF 500Hz und EF 20Hz wiederholt. Die Resultate sind den folgenden 3 Abbildungen zu entnehmen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass der NP dieser beiden DuTs stabil zu sein scheinen, relativ symmetrisch um 0 sind und keine deutlichen Sprünge respektive keine deutliche Periodizität aufweisen.

Das Nullpunktverhalten bei punktueller Belastung ist ebenfalls mit jenem der vorangegangenen DuTs vergleichbar.

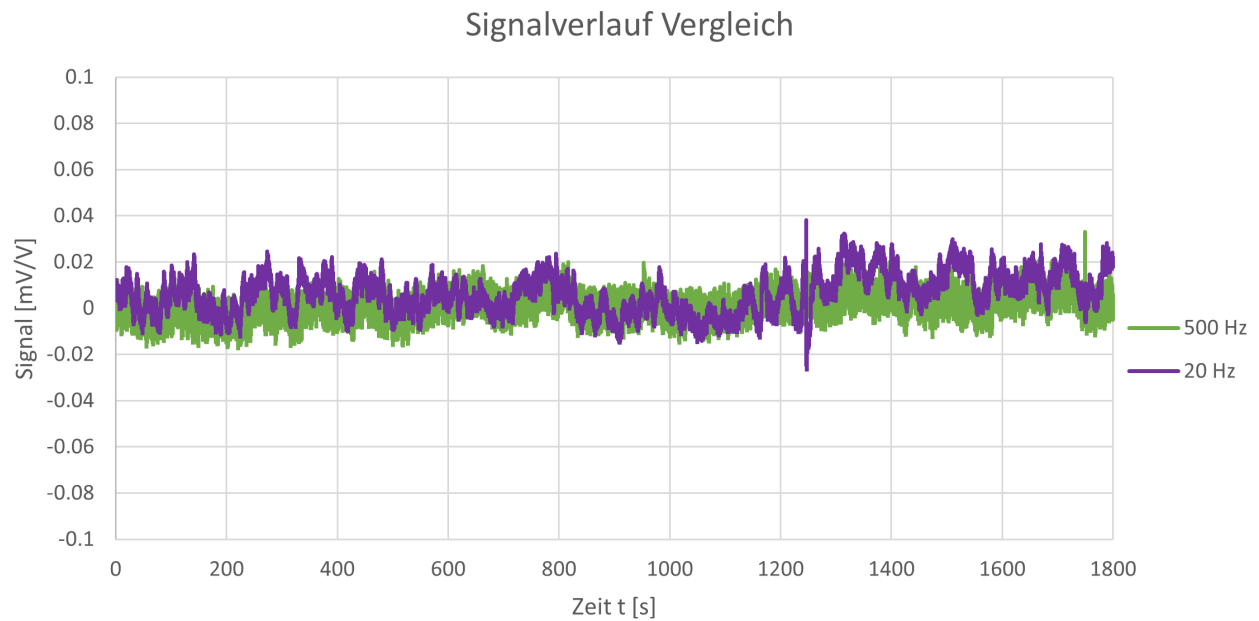


Abbildung 3.10: Langzeitbetrachtung Nullpunkt DuTs 500 Hz und 20 Hz

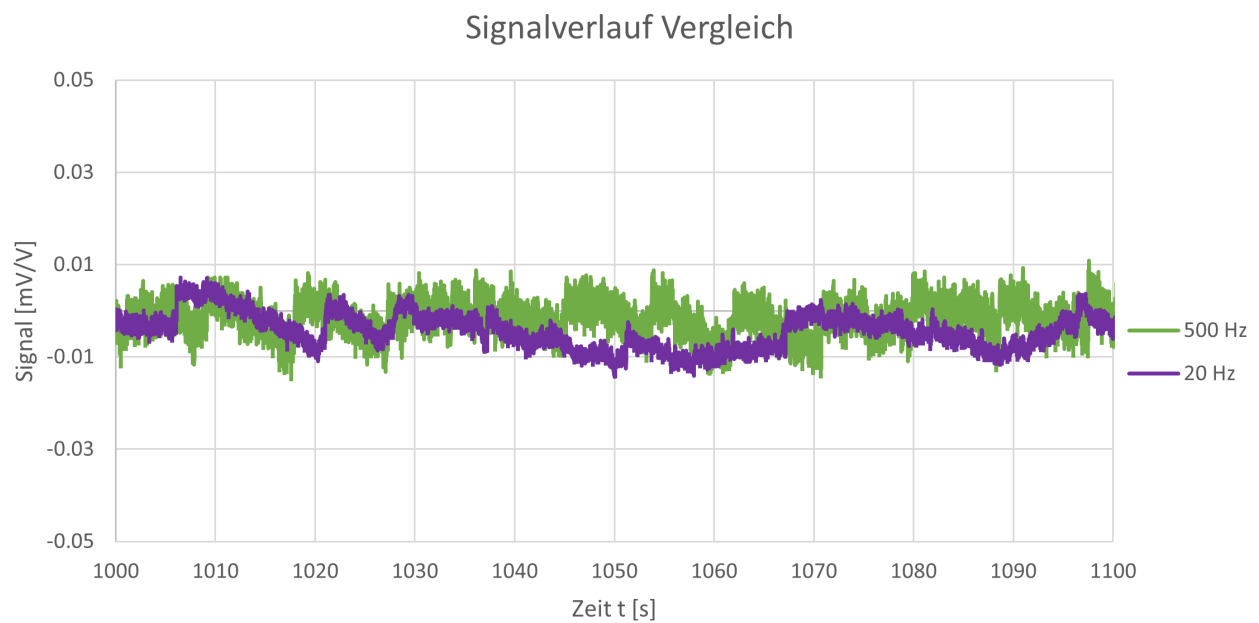


Abbildung 3.11: Ausschnitt aus Abb. 3.10

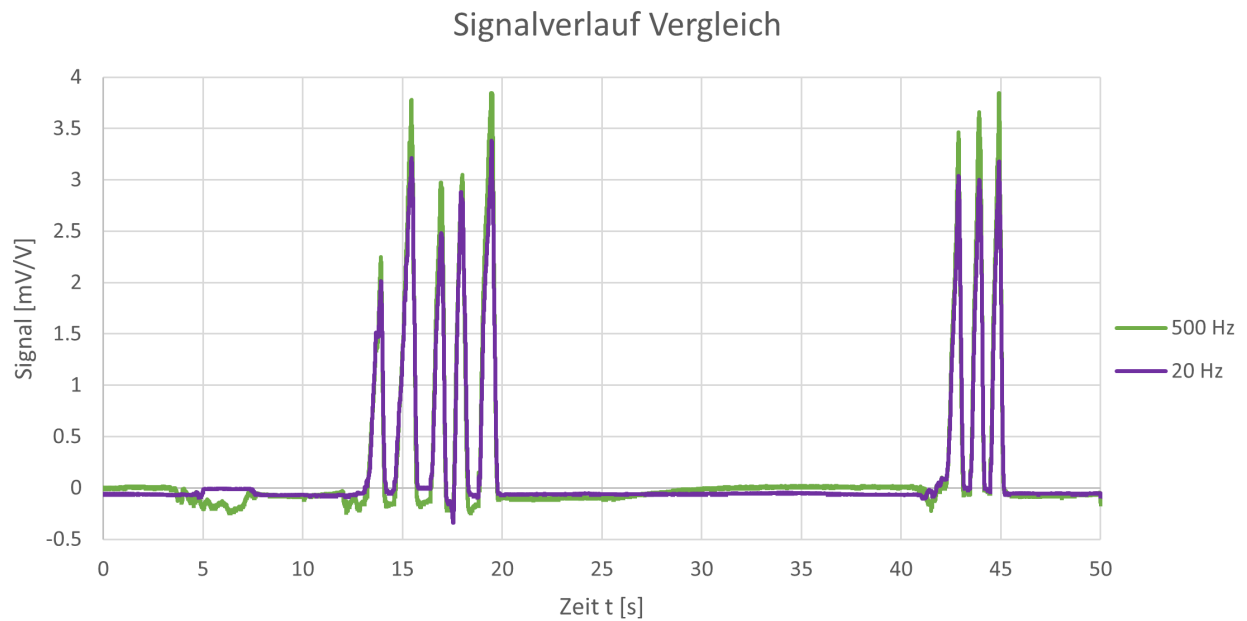


Abbildung 3.12: 500 Hz (Unvergossen) vs 20 Hz (unvergossen) bei vergleichbarer Belastung

Für die Filter-Charakterisierung wurde zu letzt noch eine FFT-Analyse der Nullpunktsignale aller DuTs erstellt. Diese sind in der untenstehenden Grafik abgebildet.

## Untersuchung Rauschverhalten

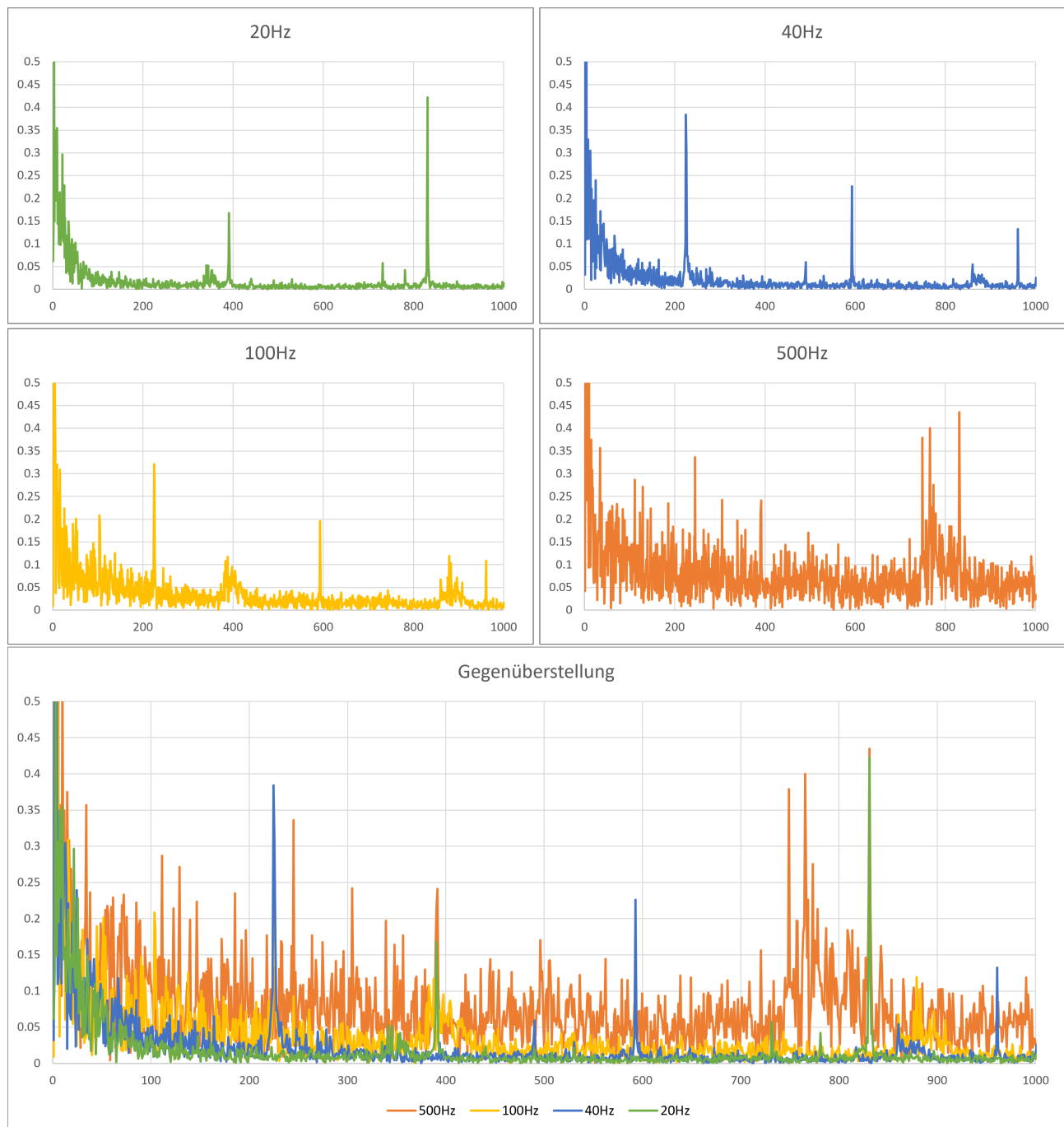


Abbildung 3.13: Spektralbetrachtung aller DuTs