Hochschule Ruhr West

Institut für Mess- und Sensortechnik

Bachelorarbeit zum Thema:

Signalanalyse und -auswertung der Messdaten eines induktiven Niederschlagsensors

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Himmel
Prof. Dr. Klaus Thelen

Betreuer:

M. Sc. Christoph Clemens

Forschungsprojekt: KIWaSuS

Eingereicht von:

Name: Alexander Bödder
Anschrift: Duisburger Str. 100, 45479 Mülheim an der Ruhr
E-Mail: alexander.boedder@stud.hs-ruhrwest.de

Matrikel-Nr.: 10011173
Studiengang: Elektrotechnik
Fachsemester: 8

Duisburg, den 15.04.2022

Kurzfassung

Die folgende Bachelorarbeit analysiert und wertet die Messdaten eines Niederschlagsensors aus, der auf dem induktiven Wirbelstromprinzip aufbaut. Der Sensor wird an der Hochschule Ruhr West im Institut für Mess- und Sensortechnik entwickelt. Er soll nach erfolgreicher Konfiguration die Niederschlagsintensität und die Tropfengröße über die Resonanzfrequenz der Spule ausgeben können. Um dieses Ziel zu erreichen, gibt die Bachelorarbeit eine Einschätzung, inwieweit das System für eine Niederschlagserfassung geeignet ist und welche Verbesserungen vorgenommen werden können. Dazu wurden die Messdaten in einer Regenkammer der Firma Lambrecht meteo GmbH erfasst. Für die Versuche wurden zwei Flachspulen mit Resonanzfrequenzen von 1,7 MHz und 8 MHz nacheinander ausgewertet. Die resultierenden Messdaten werden sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich auf Verhaltensmuster und Kennwerte untersucht. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Sensor aufgrund von äußeren Einflüssen und inneren Verhaltensweisen keine signifikante Antwort auf den Niederschlag ausgibt, um die Niederschlagsintensität und die Tropfengröße zu ermitteln. Dennoch zeigt sich, dass die Resonanzfrequenz der Spulen gegensätzliche Reaktionen hervorruft. Die Spule mit der Resonanzfrequenz von 1,7 MHz reagiert deutlich unempfindlicher auf äußere Einflüsse wie parasitäre Kapazitäten. Allerdings werden nur Regentropfeneinschläge bei hohen Niederschlagsmengen deutlich erkannt. Die Spule mit der Resonanzfrequenz von 8 MHz hingegen zeigt ein empfindlicheres Verhalten auf äußere Einflüsse. Zur Optimierung des Niederschlagssensors, muss dieser Konfiguriert werden, damit er äußeren Einflüssen robust entgegenwirkt und den Niederschlag sensibel genug detektiert. Zudem müssen Ausreißer, die in der Frequenzanalyse entdeckt wurden und von den inneren Verhaltensweisen stammen, entfernt werden.

Abstract

The following bachelor thesis analyzes and evaluates the data of a precipitation sensor based on the inductive eddy current principle. The sensor is being developed at the Ruhr West University of Applied Sciences in the Institute for Measurement and Sensor Technology. After successful configuration, it should give out the precipitation intensity and the droplet size via the resonance frequency of the coil. To achieve this goal, the bachelor thesis intends to provide an assessment if the system is suitable for precipitation detection and which improvements can be made. Therefore, the data was measured in a rain chamber from the company Lambrecht meteo GmbH. For the experiments, two flat coils with resonance frequencies of 1.7 MHz and 8 MHz were used. The results are analyzed for behavior patterns and characteristic values in both time and frequency domains. The results show a non-significant response to the precipitation due to external influences and internal behaviors. Thus, the sensor is not able to determine the precipitation intensity and droplet size. Nevertheless, the resonant frequency of the coils produce opposite responses. The coil with the resonant frequency of 1.7 MHz shows low sensitively to external influences such as parasitic capacitance. However, raindrop impacts from high precipitation rate are clearly detected. The coil with the resonance frequency of 8 MHz, displays an increased sensitively to external influences. For optimizing the precipitation sensor, it must be reconfigured to robustly counteract external influences and detect sensitively precipitation. In addition, outliers from the internal behavior and found in the frequency analysis must be removed.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ..... **I**

Abstract ..... **II**

Inhaltsverzeichnis ..... **III**

Abbildungsverzeichnis ..... **V**

Abkürzungsverzeichnis ..... **VII**

Formelzeichenverzeichnis ..... **VII**

1. Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Teilprojekt des Institut Mess- und Sensortechnik 1

1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung 2

2. Einführung in die Messeinrichtung **3**

2.1 Theoretische Grundlagen des Messprinzips 3

2.2 Erläuterung des Messprinzips 4

2.3 Aufbau der Messeinrichtung 5

2.4 Programmierung 8

3. Theoretische Grundlagen der Datenanalyse **9**

3.1 Eigenschaften stochastischer Signale 9

3.2 Autokorrelationsfunktion 10

3.3 Frequenzanalyse 11

3.3.1 Signalarten und deren Transformation 11

3.3.2 Fourier-Reihe 12

3.3.3 Diskrete Fouriertransformation 13

3.3.4 Leck-Effekt und Fensterung 14

3.3.6 Das Wiener-Chintschin-Theorem 15

3.3.7 Schätzung des Leistungsdichtespektrums 16

3.4 Box-Whisker-Plot 17

4. Datenerhebung **18**

4.1 Matlab-App 18

4.2 Versuchsaufbau 19
4.3 Messwertaufnahme und Vorgehensweise 20
5. Ergebnisse 22
5.1 Datenanalyse und -auswertung der Messreihen 22
5.1.1 Analyse der Spulen Alpha und Beta 24
5.1.2 Vergleich der Spulen Alpha und Beta 29
5.1.3 Diskussion der Datenanalyse 29
5.2 Datenanalyse und -auswertung der Peak-Differenz Methode 32
5.2.1 Vergleich der Spulen Alpha und Beta 33
5.2.2 Auswertung der PD-Methode 34
5.3 Spektralanalyse 35
6. Zusammenfassung 40
7. Fazit und Ausblick 41
Literaturverzeichnis 42
Anhang 45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Messprinzip nach dem Wirbelstrom-Effekt 3

Abbildung 2.2: Funktionsprinzip des Wirbelstrom-Effektes anhand der Induktivität L und des Abstandes s 4

Abbildung 2.3: Empfindlichkeitseinstellung über den Zusammenhang der Frequenz f und den Abstand s der Spule zur Membran 5

Abbildung 2.4: Aufbau der Messeinrichtung 5

Abbildung 2.5: Aufbau des induktiven Sensors 6

Abbildung 2.6: Ablaufplan zur Darstellung der Frequenzaufnahme 8

Abbildung 3.1: Arten der Fourier-Transformation 11

Abbildung 3.2: Komplexes Frequenzspektrum 12

Abbildung 3.3: Cosinussignal und Frequenzspektrum 14

Abbildung 3.4: Gefenstertes Cosinussignal und Frequenzspektrum 15

Abbildung 3.5: Darstellung des Box-Whisker-Plot 17

Abbildung 3.6: Histogramm zur Untermauerung des Box-Plot 17

Abbildung 4.1: Oberfläche der Matlab-App in vier Bereichen aufgeteilt 18

Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Regenkammer 19

Abbildung 5.1: Messwerte der Spule Alpha 24

Abbildung 5.2: Polynomfunktion der Signale (gerade Anzahl) von Spule Alpha 25

Abbildung 5.3: Messwerte der Spule Beta. 26

Abbildung 5.4: Polynomfunktion der Signale von Spule Beta 27

Abbildung 5.5: Zeitlicher Ausschnitt des Datensatzes der Spule Alpha (gerade Anzahl) 28

Abbildung 5.6: Zeitlicher Ausschnitt des Datensatzes der Spule Beta. 28

Abbildung 5.7: Mittelwerte (orangenes Kreuz) der PD-Methode von M1α – M10α 33

Abbildung 5.8: Mittelwerte (orangenes Kreuz) der PD-Methode von M1β – M5β 33

Abbildung 5.9: Verlauf von 65 Peak-Differenz Vektoren von M11α 34

Abbildung 5.10: Verlauf von 65 mediangefilterten Peak-Differenz Vektoren von M11β 35

Abbildung 5.11: Überlagertes Sinussignal, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum 37

Abbildung 5.12: M7α, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum 38

Abbildung 5.13: Überlagertes Sinussignal, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum 39

Abkürzungsverzeichnis

AKF	Autokorrelationsfunktion
Amp.	Amplitude
COM	communication port
DFT	Discrete Fourier Transformation
DTFT	Discrete-time Fourier Transformation
FFT	Fast Fourier Transformation
IQR	Interquartile range
KI	Künstliche Intelligenz
KIWaSuS	KI-basiertes Warnsystem für Starkregen und urbane Sturzfluten
LDS	Leistungsdichtespektrum
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LTI	linear time-invariant
M	Messung
PCNT	Pulse Counter
PD	Peak-Differenz
α	Spule Alpha
β	Spule Beta

Formelzeichenverzeichnis

$\underline{X}_n$	Fourier-Koeffizient
$\underline{G}$	Übertragungsfunktion
T_p	Periode der Ausreißer
$\underline{Z}$	Impedanz
f_0	Grundfrequenz
f_a	Abtastfrequenz
f_p	Frequenz der Ausreißer
f_s	Signalfrequenz
t_a	Abtastzeit

x_0	Mittelwert der Abtastwerte und Gleichanteil des periodischen Signales
ω_0	Grundfrequenz als Kreisfrequenz
Δt	Abtastintervall
$\mathcal{F}$	Operator zur Fourier-Transformation
Im	Imaginärteil
L	Induktivität der Spule
N	Anzahl der Abtastwerte
Q	Spulengüte
R	Ohm‘scher Widerstand der Spule
Re	Realteil
S	Leistungsdichtespektrum
T	Periode
f	Frequenz der Spule
k	Index der Stützstellen im zeitdiskreten Bereich
m	Indes der Stützstellen im zeitdiskreten Bereich (Zeitverschiebung)
n	Index der Stützstellen im Frequenzdiskreten Bereich
s	Abstand der Spule zu Membran
t	Zeit
x	Eingangssignal
y	Ausgangssignal
τ	Zeitverschiebung
ψ	Korrelationsfunktion

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt eine Teilaufgabe des Forschungsprojektes im Rahmen eines KI-basierten Warnsystems für Starkregen und urbane Sturzfluten (KIWaSuS). Das Projekt findet im Zeitraum von April 2021 bis März 2024 statt und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Das Warnsystem soll bei lokalen Starkregenereignisse die sich daraus entwickelnden Sturzfluten ortsgenau mit einem zeitlichen Vorlauf von zwei Stunden ermitteln. Als Umsetzungsort wurde aufgrund der räumlichen Nähe der beteiligten Partner die Stadt Gelsenkirchen gewählt. Nach einem erfolgreichen Projektabschluss kann das System in anderen Städten und Gemeinden eingesetzt werden. Partner sind die Hochschule Ruhr West, neusta software development West GmbH, GELSENWASSER AG, Universität Duisburg-Essen, sowie die Abwassergesellschaft Gelsenkirchen mbH. Ein weiterer assoziierter Partner und bedeutend für diese Arbeit ist die Firma Lambrecht meteo GmbH in Göttingen [1].

1.1 Motivation

Aufgrund des Klimawandels kommt es im Sommer vermehrt zu Starkregenereignissen. Diese zeichnen sich durch eine kurze Vorwarnzeit und eine hohe Intensität des Regens aus. Die Folge ist eine Aneinanderreihung von weiteren Ereignissen (Die Definition von Starkregen ist in folgender Quelle angegeben [2]). In urbanen Gebieten, wie z.B. Gelsenkirchen, kann es aufgrund von Starkregen zu einer Überlastung der Kanalnetzte kommen. Das führt zu Überschwemmungen von Straßenabschnitten und Unterführungen. Im Juli 2021 zeigte sich das Ausmaß von Starkregenereignissen in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Dort haben Sturzfluten ganze Gebiete verwüstet. Die Schwierigkeit besteht darin, die Zeit und den Ort vorherzusagen, weil Sturzfluten fast überall und mit geringer Vorwarnzeit auftreten können [3]. Als Lösung soll eine KI (Künstliche Intelligenz), Starkregenereignisse und resultierende Überflutungen vorhersagen, indem sie den Zusammenhang erlernt und auf einer digitalen Karte abbildet [4]. Die Idee ist es, dass Einsatzkräfte die Karte nutzen, um zielgerichtete Strategien auszuarbeiten. Dadurch kann die Feuerwehr schnellstmöglich am Einsatzort eintreffen, ohne von überfluteten Straßenabschnitten aufgehalten zu werden. Auch die zivile Bevölkerung kann schnellstmöglich gewarnt werden, um sich in Sicherheit zu bringen.

1.2 Teilprojekt des Institut Mess- und Sensortechnik

Die KI erhält Daten aus den Kommunen und den Wasserverbänden. Allerdings reichen diese Daten für eine detaillierte Vorhersage allein nicht aus. Das Ziel des Institutes ist es, ein energieautarken LowCost-Niederschlagssensor zu entwickeln, der die Basis für ein engmaschiges Sensorsystem in

den betroffenen Gebieten bildet. Für eine hochauflösende Messung von Starkregenzellen werden zusätzlich Niederschlagssensoren der Rain[e] Serie verteilt [5]. Die gemessenen Sensordaten werden über das Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) an eine zentrale Datenplattform gesendet [6]. Aufgrund der höheren Verteilungsdichte der Sensoren in den Gebieten, kann die KI die Genauigkeit der Starkregenvorhersage verbessern [4]. Die erste Version eines induktiven Niederschlagsensors wurde von Melvin Batalla, mit Unterstützung des Teams von Prof. Dr.-Ing. Jörg Himmel, entwickelt. Der Sensor soll in seiner finalen Version die Regenintensität und die Tropfengröße bestimmen können [4].

1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Erste Versuche mit dem Regensensor sind im Praxissemesterbericht von M. Batalla behandelt worden [7]. Der Sensor stand während der Versuche im Freien, um Regendaten aufzunehmen. Die Kommunikation vom Sensor zum PC fand mittels LoRaWAN statt. Ein Programm auf dem PC hat den gesendeten Daten einen Zeitstempel zugeordnet und sie abgespeichert. Die Datensätze konnten deshalb mit den Wetterdaten verglichen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass der Sensor auf verschiedene Regenereignisse adäquat reagiert hat. Zudem haben sich Verhaltensweisen des Systems abgebildet, die ebenfalls in dieser Arbeit untersucht werden. Die Problematik der Versuche bestand darin, dass die Niederschlagsmengen nicht eingestellt und verglichen werden konnten. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Messwertaufnahmen in einer Regenkammer der Firma Lambrecht meteo GmbH vorzunehmen. Dadurch sind die Niederschlagsmengen stufenweise einstellbar. Die Aufgabenstellung der Arbeit besteht somit aus der Analyse und Auswertung, der Systemantworten von verschiedenen Niederschlagsmengen. Zur Untersuchung wird das Programm MATLAB® von der Firma The MathWork benutzt. Mit der Software lassen sich Matrizen formulieren, Signale über Vektoren plotten und Grafiken visualisieren. Des Weiteren besitzt Matlab die Möglichkeit, Desktop Apps zu programmieren und mit Hardwarekomponenten zu kommunizieren [8]. Das Ziel der Arbeit ist es zum einen verschiedene Verhaltensmuster des Messsystems darzulegen und zu erläutern, welche Auswirkungen diese auf die Messeinrichtung und die Messergebnisse haben. Zum anderen wird eine Einschätzung gegeben, inwieweit der Sensor geeignet ist, die Regenintensität und Tropfengröße zu erkennen. Die Beurteilung basiert auf den folgenden drei Fragestellungen und den Verhaltensweisen des Systems.

1. Liefert das System eine ausreichende Antwort auf den Niederschlag?
2. Kann über die Resonanzfrequenz der Niederschlag zugeordnet werden?
3. Welche Spule ist besser zur Auswertung des Niederschlages geeignet?

Zudem wird aufgezeigt, welche Verbesserungen vorgenommen werden können, um den Sensor zu optimieren. Die Datensätze stammen aus der Regenkammer und von Einzelmessungen aus dem Labor.

2. Einführung in die Messeinrichtung

Das Kapitel unterteilt sich in vier Abschnitte. Der erste Abschnitt zeigt den Grundbaustein des Regensensors, der mit Hilfe einer Abbildung erklärt wird. Es folgt eine Erläuterung des Messprinzips, in der die Problematik zur Empfindlichkeit aufgezeigt wird. Zudem werden erste theoretische Annahmen getroffen. Wie das System aufgebaut ist und welcher Algorithmus die Messdaten auswertet, wird in den letzten zwei Kapiteln beschrieben.

2.1 Theoretische Grundlagen des Messprinzips

Die Funktion des induktiven Regensensors baut auf dem Wirbelstromprinzip auf (siehe Abb. 2.1). Dazu wird ein Wechselstrom durch eine Spule geleitet, die ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Das erzeugte Feld wird primäres magnetisches Wechselfeld genannt und dringt in ein elektrisch leitfähiges Material ein. Im weiteren Schritt erzeugt das magnetische Wechselfeld, nach dem Induktionsgesetzt, einen Wirbelstrom im Material. Die Wirbelströme sind in sich geschlossene Ströme und bewirken ein sekundäres magnetisches Feld, welches, nach der Lenz'schen Regel, in Gegenrichtung zum primären Feld wirkt. Auf Grund des Gegenfeldes findet eine Impedanzänderung in der Spule statt [9, p. 584].

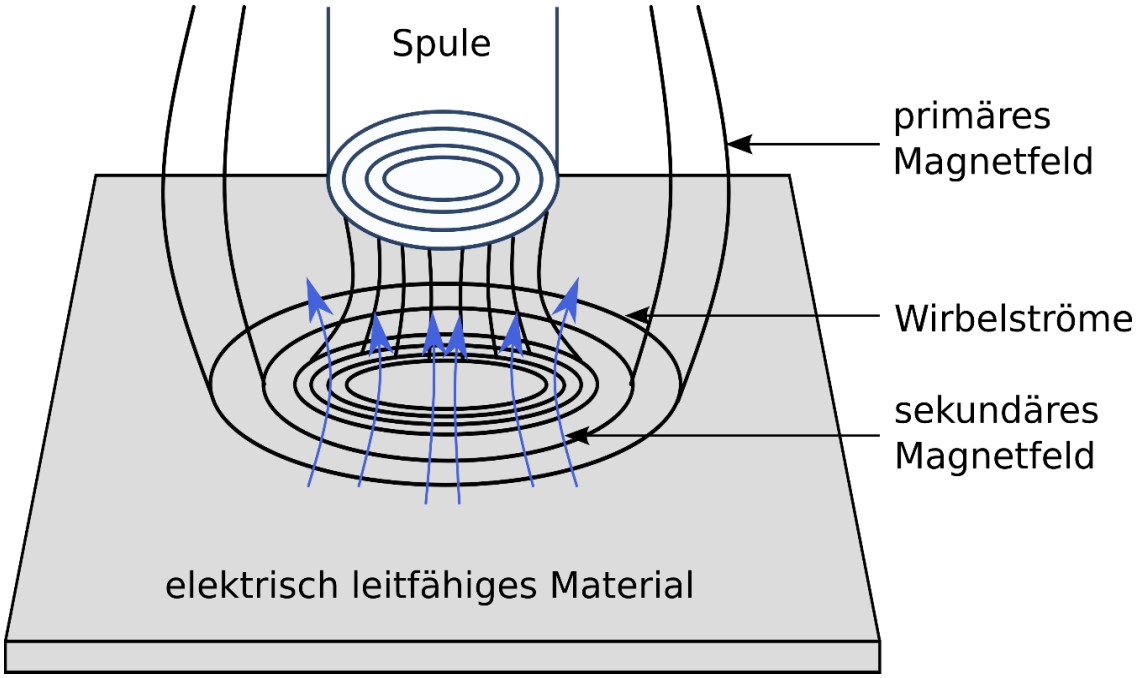

Abbildung 2.1: Messprinzip nach dem Wirbelstrom-Effekt (Vgl. [9, p. 584])

Das Verhältnis vom Abstand der Spule zum Messobjekt und der folgenden Induktivitätsänderung hängt davon ab, aus welchem Material das Objekt besteht. Grundsätzlich muss es elektrisch leitfähig sein, aber nicht magnetisch leitfähig. Platten aus Kupfer, Aluminium oder Messing dämpfen die Induktivität der Spule. Messobjekte die ferromagnetische Eigenschaften besitzen (Eisen, Kobalt, Nickel), sorgen bei Annäherung der Spule für eine größere Induktivität [10, p. 186]. Folgendes Bild verdeutlicht das Prinzip.

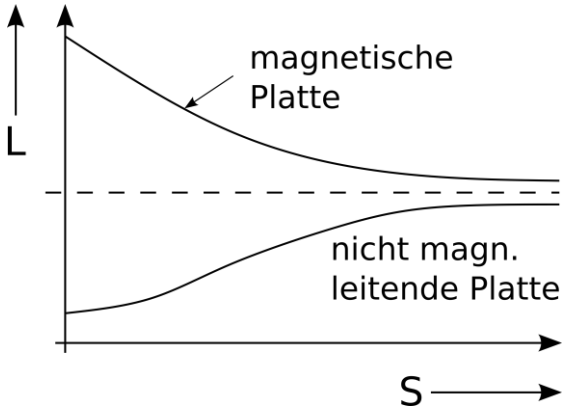

Abbildung 2.2: Funktionsprinzip des Wirbelstrom-Effektes anhand der Induktivität L und des Abstandes s [10, p. 186].

Wie die Impedanzänderung und die Induktivität der Spule zusammenhängt, wird über die Spulengüte Q in Formel (2.1) dargestellt. Die Formel bildet sich aus der Induktivität L und des Ohm'schen Widerstandes R der Spule, sowie der Frequenz f des Wechselstromes. Auf die Frequenz wird im nächsten Abschnitt weiter eingegangen, da sie einen wesentlichen Bestandteil des Messverfahrens einnimmt.

$$Q = \frac{Im(\underline{Z})}{Re(\underline{Z})} = \frac{2\pi f\, L}{R} \tag{2.1}$$

Zusätzliche Information zu der Formel und wie die Güte verbessert werden kann steht in der Quelle [9, p. 586] oder im Praxissemesterbericht von Melvin Batalla [7].

2.2 Erläuterung des Messprinzips

Bis jetzt wurde erläutert, wie aufgrund einer Abstandsänderung, eine Impedanzänderung in der Spule hervorgerufen wird. Um an eine messtechnische Größe zu gelangen, die ebenfalls im direkten Zusammenhang mit dem Abstand zum Messobjekt steht, wird ein Schwingkreis mit Komparator und Kondensator parallel zur Spule verschaltet. Der Komparator hat zugleich zwei Aufgaben. Zum einen hält er den Schwingkreis und die Resonanzfrequenz aufrecht. Zum anderen koppelt er das Signal an einen zweiten Ausgang aus, um es unabhängig vom Schwingkreis weiter zu verarbeiten [7].

Die Art der Verschaltung nennt sich freischwingender Oszillator, in der „die Impedanzänderung der Sensorspule mit einer entsprechenden Änderung der Resonanzfrequenz […] verbunden ist“ [9, p. 585]. Somit befindet sich die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit zum Abstand *s* und zeigt das Verhalten einer abfallenden e-Funktion (siehe Abb. 2.3).

Durch Anpassung der Schwingkreisparameter und dem Abstand zwischen Membran und Spule kann jeder beliebige Arbeitspunkt eingestellt werden (siehe Abb. 2.3). Dabei ist die Empfindlichkeit zu beachten. Bei zu niedrigen Frequenzen sind Änderungen im Abstand nur schwer zu detektieren. Bei zu hohen Frequenzen ist das System jedoch anfälliger Gegenüber äußeren Störungen. Mit dem Prinzip der Abstandsänderung kann im Weiteren die Detektion von Regen erläutert werden. Dazu wird eine dünne Membran mit einem vordefinierten Abstand oberhalb einer Flachspule angebracht. Die Membran muss ausreichend dünn und flexibel sein, um sich beim Einschlag von Regentropfen zu verformen. Durch diese Verformung ändert sich der Abstand. Mit der Methode soll berührungslos die Größe des Regentropfens und die Regenintensität detektiert werden. Folgende Punkte werden auf Grund dessen angenommen.

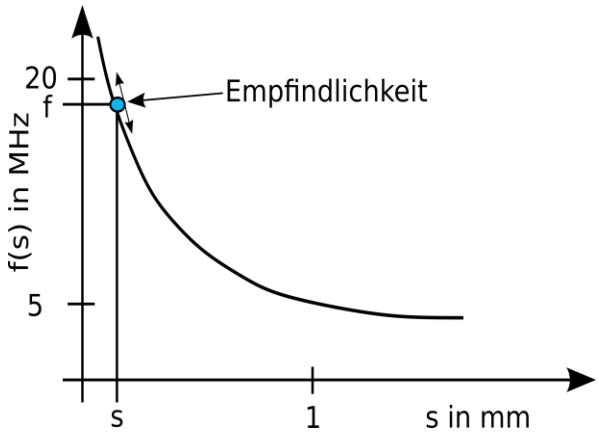

Abbildung 2.3: Empfindlichkeitseinstellung über den Zusammenhang der Frequenz f und den Abstand s der Spule zur Membran (Vgl. [29]).

1. Je größer die Masse des Regentropfens, umso größer die Amplitude des Frequenzausschlages.
2. Je stärker die Regenintensität, umso größer die Resonanzfrequenz.

2.3 Aufbau der Messeinrichtung

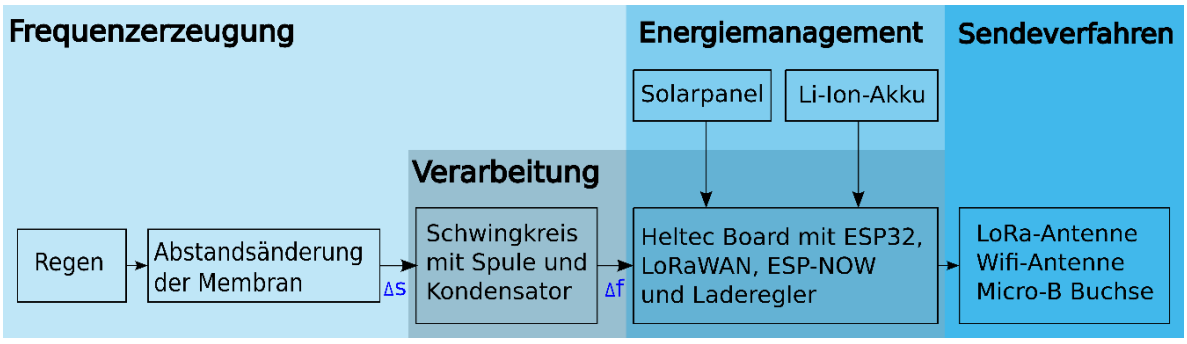

Abbildung 2.4: Aufbau der Messeinrichtung

Der Sensor benötigt neben der Hardware zur Frequenzerzeugung ein Solarpanel und ein Akku, um energieautark arbeiten zu können. Die Verarbeitungseinheit übernimmt das Board „Wifi LoRa 32“ der Firma Heltec Automation. Es hat mehrere Gründe, warum man sich für dieses Board entschieden hat. Zum einen besitzt die Platine einen Laderegler, der die Regelung des Stromes übernimmt. Somit muss kein externer Laderegler verwendet werden. Zum anderen ist ein Chip für die LoRa-Kommunikation (engl. Long Range) mit zugehöriger Antennenanbindung integriert. Die Abarbeitung des Algorithmus wird vom ESP32 durchgeführt. Die Programmieroberfläche bildet die Arduino IDE. Zusätzliche Informationen zu dem Board finden sich hier [11]. LoRaWAN hat vergleichsweise eine langsamere Baudrate gegenüber anderen Funk-Technologien. Die Baudrate liegt bei 0,3 kbps bis 50 kbps [12]. LTE-M hat hingegen eine eine Baudrate bis zu 1 Mbps [13]. Um den Server nicht zu überlasten, sammelt man die Daten und sendet sie in Minutenintervallen. Für die Datenerhebung ist es jedoch wichtig, die Frequenzen direkt nach der Messwertaufnahme zu senden. Verschiedene Versuche haben ergeben, dass ein großer Satzt an Frequenzen, während des Sendeverfahrens über LoRaWAN verloren gegangen sind [7]. Als Alternative bietet das Heltec-Board die Funkübertragung ESP-NOW an. Das Protokoll ähnelt der von WLAN. Es benutzt die gleiche Antenne und sendet auf der Frequenz von 2,4 GHz [14]. Zudem ermöglicht es einen geringen Stromverbrauch und ist somit für den Einsatz im Akku-Betrieb geeignet. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Verbindung zwischen zwei Geräten. Zum Anfang des Sendeverfahrens wird ein einmaliges Pairing benötigt, danach ist eine sichere Peer-to-Peer Verbindung aufgebaut, die ohne weitere Handshakes auskommt. Dazu wird eine Mac-Adresse vergeben, die in den Mikrocontrollern abgespeichert wird [15]. Mit diesem Verfahren kommen alle Frequenzwerte in Millisekundentakt beim Empfänger an. LoRaWAN hingegen soll aufgrund der hohen Reichweite und des geringen Strombedarfs [12], für die Anwendung im Betrieb eingesetzt werden.

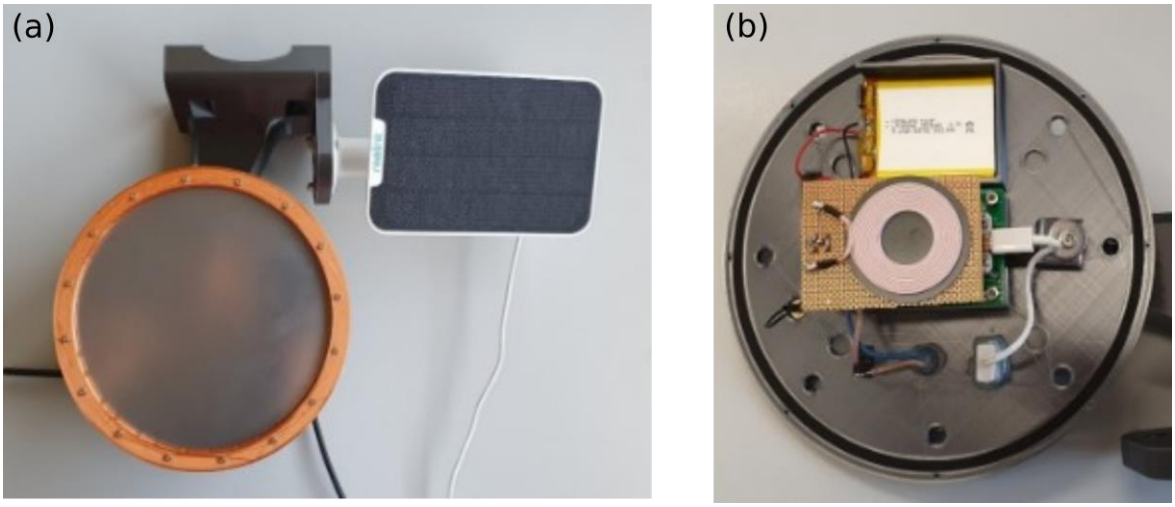

Abbildung 2.5: Aufbau des induktiven Sensors. (a) Sensor mit Halterung, Solarpanel, Membran und Dichtungsring, (b) Untere Seite des Sensors mit Flachspule, Akku und Platine.

Der Sensor ist wie folgt zusammengebaut. In Abb. 2.5 (a) wurde eine Membran aus Edelstahl 1.4031 mit einer Stärke von 0,2 mm verwendet, die mit einem Dichtungsring befestigt ist. Der Ring sorgt dafür, dass die Membran gleichmäßig aufgespannt ist und kein Wasser in das Innere des Gehäuses gelangt. Wenn dennoch Wasser eindringt, befindet sich im Inneren des Gehäuses ein Abflussring (siehe Abb. A.2). Die Höhe des Dichtungsringes beträgt 5,5 mm. Damit sich aufgrund der Höhe wenig Wasser auf der Membran bildet, sind an der Unterseite des Ringes, im gleichmäßigen Abstand, 16 Löcher eingefügt. Die Durchführungen sorgen infolge der Schieflage des Sensors dafür, dass das Wasser abgeleitet wird. Auf der Unterseite befinden sich dazu Winkelblöcke mit Schieflage, welche den Sensor um 12 Grad ankippen (siehe Abb. A.1). Die Abb. 2.5 (b) zeigt das Innenleben des Sensors. In der oberen Hälfte ist ein 10.000 mAh Li-Ion-Akku und mittig eine Flachspule mit Ferritscheibe verbaut. Unter der Spule ist die Platine mit dem Heltec Board und dem Schwingkreis angebracht.

2.4 Programmierung

Die Programmierung baut auf dem Code von Rui Viana und Jose Gustavo auf [16] und wurde für die Anwendung angepasst. Der Code bietet die Möglichkeit, Frequenzen von 1 Hz bis 40 MHz zu messen, ohne dass ein eigenes Programm entwickelt werden musste. Die verwendeten Flachspulen haben nach ersten Versuchen Resonanzfrequenzen von 3 MHz bis 16 MHz erzeugt. Sie liegen somit im Frequenzbereich des Algorithmus. Zum Einlesen der Frequenzen wird der Pulse Counter (PCNT) des ESP32 verwendet. Der PCNT baut auf dem ABP-Takt von 80 MHz auf und hat einen 16-Bit großen Zähler [17]. Aufgrund des Nyquist-Theorems kommt die Frequenz von maximal 40 MHz zustande.

Im Folgenden wird der Ablauf der Programmierung erläutert. Nachdem die Frequenzen vom Schwingkreis erzeugt werden, zählt der PCNT die Anzahl der auf- und absteigenden Flanken. Innerhalb eines eingestellten Abtastintervall von 10 ms werden die Anzahl der Flanken bestimmt und an die Variable *pulses* übergeben. Bei 1 MHz ergeben sich dementsprechend 20.000 Flanken.

$$pulses = 2 * 10\,ms * 1.000\,Hz = 20.000$$

Im nächsten Schritt erfolgt eine Division der Flankenanzahl mit Zwei, da nur das Interesse an einer Flanke gilt. Zuletzt wird der Wert mit dem Faktor 100 multipliziert, um an das Abtastintervall zu gelangen. Folgende Formel zeigt die Berechnung der Frequenz.

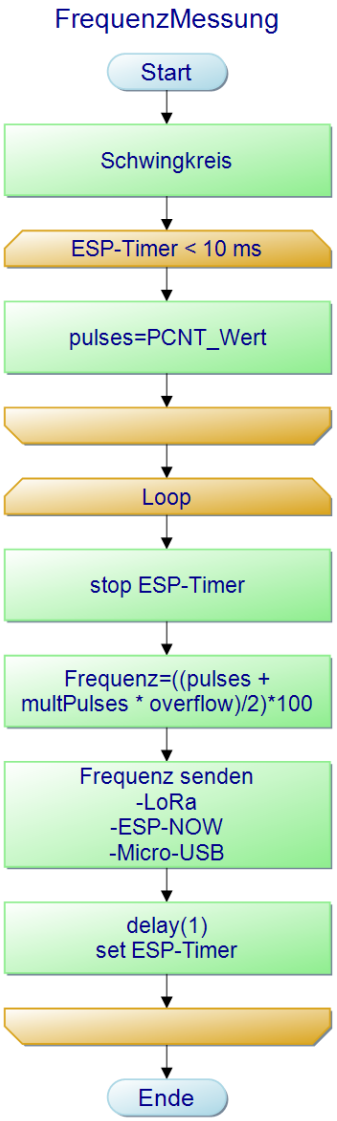

Abbildung 2.6: Ablaufplan zur Darstellung der Frequenzaufnahme am Tag der Datenerhebung.

$$Frequenz = \frac{(pulses + multPulses * overflow)}{2} * \frac{1}{Sampletime} \tag{2.2}$$

In der Konfiguration entspricht die Auflösung des Sensors 100 Hz. Bei einer Anzahl von mehr als 30.000 Flanken, löst eine Interrupt-Routine aus. In der Routine wird die Variable *multPulses* von Null auf Eins erhöht und die gezählten Flanken werden nach Ablauf des Timers an *pulses* übergeben. Die Variable $overflow$ entspricht dem eingestellten Maximalwert. In diesem Fall 30.000.

3. Theoretische Grundlagen der Datenanalyse

Für die Datenanalyse und -auswertung werden in diesem Kapitel die theoretischen Grundlagen dargelegt. Da die Datensätze auf dem Zufall aufbauen, wird im ersten Abschnitt des Kapitels auf stochastische Signale eingegangen und Begriffe erklärt. Die Frequenzanalyse ist ein wichtiger Bestandteil um Verhaltensweisen des Systems, bezogen auf wiederkehrende Ereignisse zu verstehen. Sie macht einen Großteil der Arbeit aus und wird dementsprechend in Kapitel 3.3 ausführlicher beschrieben. Der Box-Whisker Plot eignet sich zur zeitlichen Analyse der Daten, indem er Lage- und Streuungsmaße übersichtlich darstellt [18]. Angesichts des niedrigen Bekanntheitsgerades wird er im Kapitel 3.4 erläutert.

3.1 Eigenschaften stochastischer Signale

Stochastische Signale sind häufig Sprachsignale, thermisches Rauschen oder Signale von Geräuschmessungen. Alle derartigen Signale haben dabei einen gemeinsamen Nenner. Eine physikalische Einwirkung, die das Signal mit mehr oder weniger starken Anteilen an Zufall überlagert. Der Anwendungsfall besteht meist darin, an das Nutzsignal zu gelangen, dass vom Rauschen überlagert wird oder an aussagekräftige Kenngrößen, die das Signal beschreiben.

Da das Signal einen zufälligen Anteil besitzt, werden auch die Kenngrößen mit einem Zufall befangen sein. Das führt dazu, dass man Schätzungen durchführen muss. Auch bei der Spektralanalyse wird es dementsprechend zu einer Schätzung kommen. Das erweiterte Ziel ist es, die zufälligen Anteile, in diesem Sinne auch die Varianz, zu unterdrücken, um eine erwartungstreue Schätzung durchführen zu können. Um aus den zufälligen Größen eine Kenngröße mit einer gewissen Aussagekraft zu bestimmen, wird eine Schar an Signalen aufgenommen. Dazu muss der Erzeugungsmechanismus und die Umgebungsbedingungen gleichbleiben. Aus der Schar von Signalen bildet sich ein **stochastischer Prozess** mit gemeinsamen Kenngrößen, wie beispielsweise dem Erwartungswert oder der Varianz [19, p. 403]. Der stochastische Prozess ist somit einer nicht zufälligen Kenngröße zugeordnet. Als Beispiel dient die Rauschspannung eines Widerstandes, die trotz einer gewissen Streuung im Mittel Null sein sollte. Somit ergibt sich eine feste statistische Kenngröße, die bei einzelnen Signalen nicht aussagekräftig genug erscheint. Dennoch ist der Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht vorhersagbar. Da die Streuung der Amplituden aber meist einer Gaußverteilung folgt, kann der Zeitpunkt t einer Zufallsvariable X_t mit festen statistischen Parametern zugeordnet werden. Ein weiterer Begriff ist die **Musterfunktion**, die eine zeitliche Abfolge von Zufallsvariablen darstellt [19, p. 403]. Wenn der stochastische Prozess **stationär** ist, wird von einer Musterfunktion gesprochen, in der die statistischen Kennwerte der Zufallsvariablen unabhängig von der Zeit bzw. der Zeitverschiebung τ, gleichbleiben [20, p. 68].

Zusammengefasst wird für eine hohe Aussagekraft der statistischen Parameter eines stationär stochastischen Prozesses, eine große Anzahl an Musterfunktionen benötigt. In der Praxis ist diese Anzahl meist nicht gegeben, wodurch die Schätzung weniger erwartungstreu wird. In der Ausgangssituation hilft der Erzeugungsmechanismus. Wenn dieser während der Messungen gleichgeblieben ist, können Scharkennwerte aus den Zeitkennwerten ermittelt werden. Hierbei muss die Messdauer lange genug gehalten werden, damit das Szenario auftritt [19, p. 411]. Der stationäre stochastische Prozess nennt sich dann **ergodisch** [21, p. 17]. Als Beispiel dient hier ebenfalls das Widerstandsrauschen. Anstatt die Rauschspannung an mehreren Widerständen parallel zu messen, kann mit einem einzigen Widerstand und gleichbleibender Temperatur hintereinander gemessen werden [19, p. 411]. Entscheidend ist der gleichbleibende Erzeugungsmechanismus.

3.2 Autokorrelationsfunktion

Die Zeitverschiebung τ wird sowohl in der Stationarität, als auch in der Autokorrelationsfunktion (AKF) einer besonderen Bedeutung zu geschrieben. Mit ihr wird der Zusammenhang zwischen dem Signal $x(t)$ und dem zeitlich verschobenen Signal $x(t+\tau)$ verglichen. Dazu gehört nicht nur der innere Zusammenhang des stationären stochastischen Prozesses, sondern auch die Entdeckung von verborgenen periodischen Anteilen im Signal. Anders ausgedrückt Informationen zu Frequenzen. Aus diesem Grund wird die AKF im Kapitel 3.3 erneut aufgegriffen.

Die Berechnung der AKF erfolgt über die Ermittlung des mittleren quadratischen Abstandes, der mit laufender Zeitverschiebung kleiner wird. [19, p. 407] Die Formel gibt die AKF im diskreten Bereich an.

Es gilt $\tau = m\,\Delta t$

$$\psi_{xx}(m) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^{N} x(k)\, x(k+m) \tag{3.1}$$

Wenn k gleich Null gesetzt wird, entsteht das Maximum der Korrelation, da sich das Signal nicht verschoben hat und dementsprechend übereinander liegt. Dieser ist gleichzeitig der quadratische Mittelwert der Funktion. Der Maximalwert kann auf 1 normiert werden. Das Ergebnis der AKF nimmt häufig Verläufe einer Glocke, Überschwinger oder eines Exponentialtyps an [20, p. 81]. Je breiter diese Funktion ist, umso größer ist der innere Zusammenhang im Signal.

3.3 Frequenzanalyse

3.3.1 Signalarten und deren Transformation

In der Frequenzanalyse wird das Signal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert, um an Informationen von frequenten Anteilen im Signal zu gelangen. Jedoch gibt es unterschiedliche Signalklassen. Sie werden in 4 Gruppierungen unterteilt und müssen dementsprechend mit verschiedenen Transformationsarten behandelt werden. In den ersten Abschnitten wird auf die Fourier-Reihe und deren diskrete Version, die Discrete Fourier Transformation (DFT) eingegangen. Beide bauen auf ein periodisch fortgesetztes Signal auf, mit dem Unterschied der zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Version. Die Fourier-Transformation und die Discrete-time Fourier Transformation (DTFT) hingegen bilden ein kontinuierliches Spektrum, wo die Problematik für Matlab ersichtlich wird, da nur diskrete Werte dargestellt werden können.

	zeitkontinuierliches Signal	zeitdiskretes Signal
periodisch fortgesetztes Signal	Fourier-Reihe ↓ diskretes Spektrum	DFT ↓ diskretes periodisches Spektrum
nicht-periodisches Signal	Fourier-Transformation ↓ kontinuierliches Spektrum	DTFT ↓ kontinuierliches und periodisches Spektrum

Abbildung 3.1: Arten der Fourier-Transformation (Vgl. [27] und [20, p. 101])

Es gibt nach den vier Transformationsarten eine fünfte, die für stochastische Signale geeignet ist. Mit der Methode wird sich ab dem Kapitel 3.3.6 befasst, baut aber auf den Transformationsarten der periodischen Signale auf. Deshalb wird unter anderem im ersten Abschnitt detaillierter auf die Transformationsarten eingegangen. Außerdem werden in diesem Kapitel Effekte erklärt, die im Ergebnisteil auftauchen.

3.3.2 Fourier-Reihe

Mit der Fourierreihenentwicklung lassen sich periodische Funktion mit ganzzahligen Vielfachen harmonischer Schwingungen von der Kreisfrequenz $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ reproduzieren. Die Formel zur Beschreibung der Fourierreihe wird in komplexer Darstellung angegeben. Der Grund liegt unter anderem darin, dass Matlab die komplexen Fourier-Koeffizienten $\underline{X}(n)$ abspeichert. Die komplexe Fourier-Reihe eines zeitkontinuierlichen und periodischen Signals sieht wie folgt aus.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{X}_n \, e^{jn\omega_0 t} \tag{3.2}$$

In der e-Funktion sind die harmonischen Schwingungen in Form von Sinus und Cosinus hinterlegt und geben die Vielfachen der Frequenz an. Dazu wurde die Euler-Umformung angewandt, um vom reellen in den komplexen Bereich zu gelangen.

$$e^{jn\omega_0 t} = \cos(n\omega_0 t) + jsin(n\omega_0 t) \tag{3.3}$$

Das Signal $x(t)$ ist wie folgt aufgebaut. Es wird zu jeder Frequenz ω_0, in n Iterationsschritten, ein komplexer Fourier-Koeffizienten $\underline{X}_n$ zugeordnet. Gezählt wird von minus bis plus unendlich. Infolge dessen entsteht ein Linienspektrum, dass in n Schritten unterteilt ist und einen negativen Spektralbereich aufweist. Der negative Bereich besteht demnach aus den konjungiert komplexen Fourier-Koeffizienten. Zur Berechnung der Koeffizienten wird folgende Formel verwendet.

$$\underline{X}_n = \frac{1}{T} \int_T \; x(t) \, e^{-jn\omega_0 t} \, dt \tag{3.4}$$

Um an die Informationen in den Fourier-Koeffizienten zu gelangen, muss der Betrag und die Phase genommen werden. Über dem Betrag wird demnach die Amplitude der zugehörigen Frequenz errechnet und über die Phase die Phasenverschiebung. Aus der Amplitude kann das Frequenzspektrum aufgebaut werden (siehe Abb. 3.2). Es ist zu beachten das x_0 den Mittelwert bzw. den Gleichanteil angibt [20, p. 117]. Aufgrund der Umrechnung in die komplexe Ebene kommt der Faktor 2 zustande. Er wird bei der Darstellung im Ergebnissteil gekürzt. Weitere Informationen zur Umrechnung finden sich hier [20].

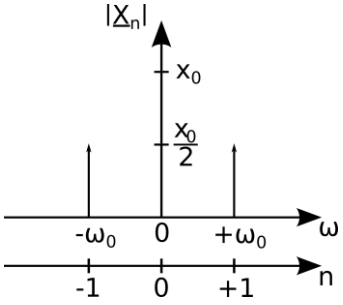

Abbildung 3.2: Komplexes Frequenzspektrum (Vgl. [20, p. 109])

3.3.3 Diskrete Fouriertransformation

In der Praxis ist es üblich, kein kontinuierliches Signal, sondern ein abgetastetes Signal zu transformieren. Demzufolge wird zur Berechnung der Fourier-Koeffizienten aus dem Integral eine Summenformel. Die entstandene diskrete Fourier-Transformation (DFT) erzeugt aus N diskreten Werten wiederrum N diskrete Spektrallinien und kann aus diesem Grund für computergestützte Verfahren eingesetzt werden. Die Periode setzt sich bei der DFT aus der Anzahl der Abtastwerte und dem Zeitintervall der Abtastzeit zusammen $T = N\,\Delta t$. In der Arbeit wird nicht die Periode des Signals, sondern ein ganzes Signalfenster genutzt und als Periode T interpretiert. Die DFT erzeugt das Spektrum, indem das Signalfenster periodisch fortgesetzt wird. Jener Aspekt wird im Kapitel der Spektralanalyse mitberücksichtigt. Mit dem setzen des Faktors 1/N vor die Summe und wenn $n = 0$ angenommen wird, kann der Mittelwert der Abtastwerte bzw. der Gleichanteil x_0 des Signales berechnet werden (siehe Formel 3.6). Alternativ gibt es Schreibweisen, die den Vorfaktor weglassen. Die Umrechnung der Exponentialfunktion vom kontinuierlichen in den diskreten Bereich erfolgt im nächsten Schritt.

$$e^{-jn\omega_0 t} = e^{-jn\frac{2\pi}{N\Delta t}k\Delta t} = e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \tag{3.5}$$

Mit $T = N\,\Delta t$ und der Tatsache, dass die Zeit in k Schritten und dem Abtastintervall von Δt abgetastet wurde ($t = \Delta t\,k$), lässt sich die DFT zu Berechnung der Fourier Koeffizienten $\underline{X}(n)$ aufstellen.

$$\underline{X}(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x(k)\, e^{-j2\pi\frac{nk}{N}} \tag{3.6}$$

Zu den weiteren Eigenschaften der DFT gehört, dass der Abstand zweier Spektrallinien der Grundfrequenz f_0 des Signals entspricht. Die Anzahl der Spektrallinien bzw. der Abtastwerte sind im Zeit-, als auch im Frequenzbereich gleich.

$$Nf_0 = N\frac{1}{N * \Delta t} = f_a \tag{3.7}$$

Für eine recheneffizientere und somit eine schnellere Verarbeitung der Daten existiert die Schnelle-Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier Transform, FFT). Die DFT muss eine Anzahl von N^2 Multiplikationen durchführen. Um die rechenaufwändigen Operationen zu verringern, wird die Radix-2-FFT angewandt. Sie zerlegt die DFT in zwei Hälften ($N^2/2$), bis nach einer sukzessiven Fortsetzung zwei Abtastwerte übrigbleiben [22, p. 117]. Aus diesem Grund macht es Sinn die Länge N

im 2er-Potenz Format zu wählen. Die Anzahl der Operatoren wird bei der FFT auf $N \log_2 N$ verringert [20, pp. 129-130]

3.3.4 Leck-Effekt und Fensterung

Ein Effekt der zustande kommt, wenn die Abtastfrequenz f_a nicht dem ganzzahligen Vielfachen der Signalfrequenz f_s entspricht, nennt sich Leck- oder Leakage-Effekt [20, p. 135]. Infolgedessen entstehen Diskontinuitäten um den Bereich der Spektrallinie, die zu einer Verzerrung der Amplitude führen. Die Spektrallinie findet sich indes nicht auf der Grundfrequenz wieder. Wie in Abbildung 3.3 (c) zu erkennen, befinden sich zwei Spektrallinien um der Grundfrequenz. Zudem liegt die Amplitude nicht bei 5, sondern knapp über 3.

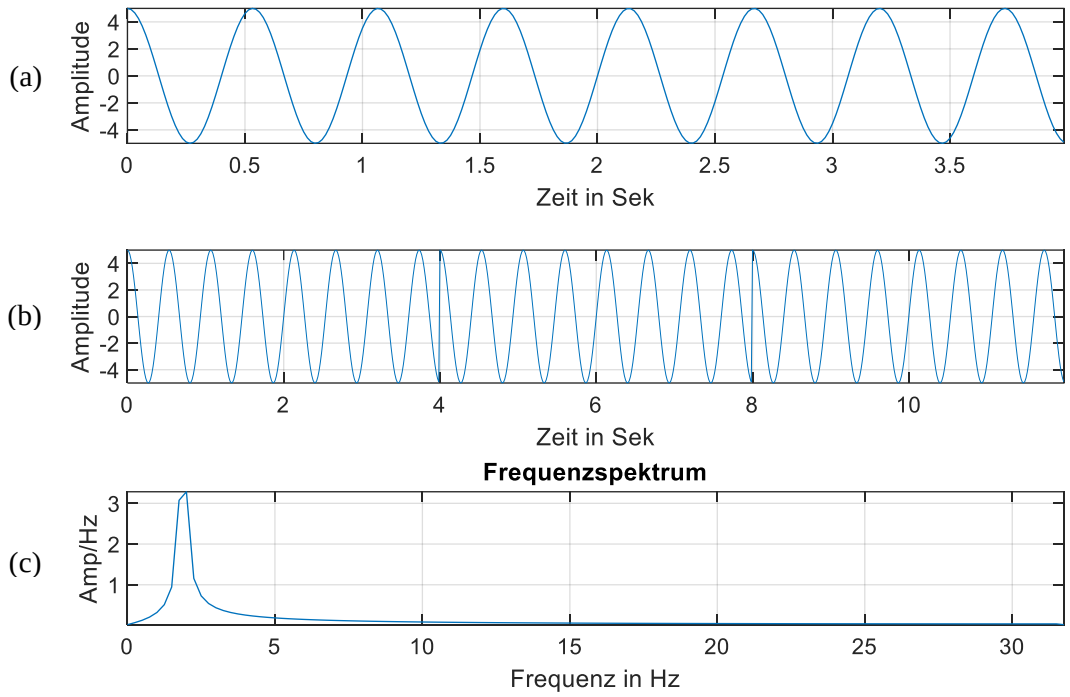

Abbildung 3.3: Cosinussignal und Frequenzspektrum. (a) Cosinusschwingung mit f_s = 1,875 Hz und einer Amplitude von 5, (b) periodische Fortsetzung der Cosinusschwingung, (c) Frequenzspektrum mit hochfrequenten Anteilen.

Das Entstehen der Diskontinuitäten lässt sich auf den steilen Übergang zwischen zwei Perioden zurückführen (siehe Abb. 3.3 (b)). Um den Übergang zu erzeugen, entstehen hohe Vielfache der Grundfrequenz, wie bei der Fourierreihenentwicklung eines Rechtecks. Warum der Effekt entstanden ist lässt sich leicht zeigen.

$$\frac{f_a}{f_s} = \frac{64\ Hz}{1{,}875\ Hz} = 34{,}13$$

Das Ergebnis der Rechnung belegt, dass die Abtastfrequenz kein ganzzahliges Vielfaches der Signalfrequenz ist. Eine Möglichkeit ist die Abtastfrequenz dementsprechend anzupassen. Eine andere wäre, die Messdauer zu erhöhen, damit die Periode ein ganzes Vielfaches bildet.

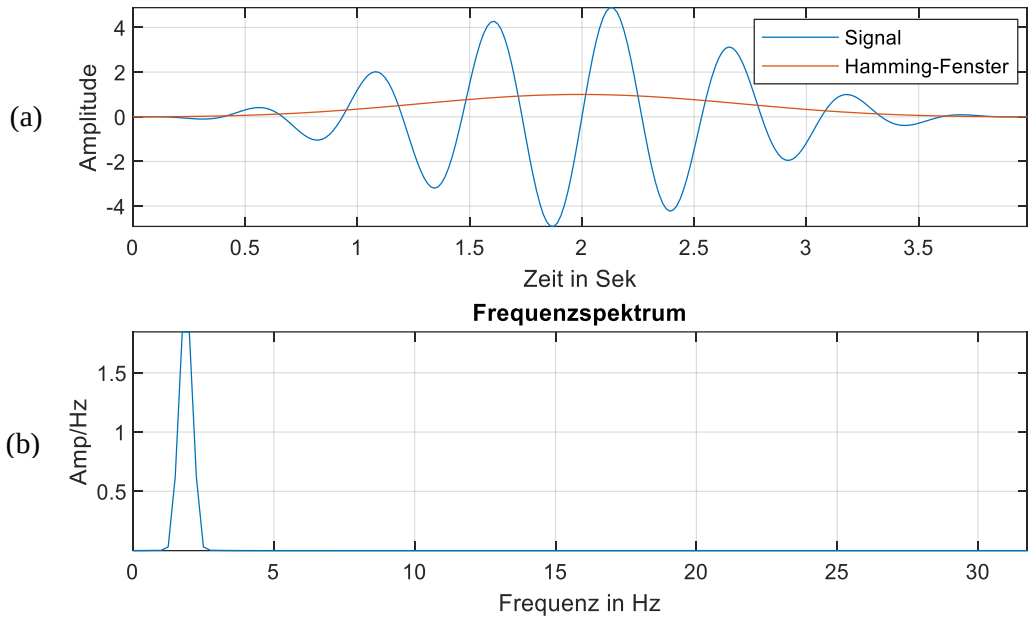

Abbildung 3.4: Gefenstertes Cosinussignal und Frequenzspektrum. (a) Cosinusschwingung mit 1,875 Hz, Amplitude von 5 und mit Hamming gefenstert, (b) Frequenzspektrum ohne hochfrequente Anteile.

Wenn die eben genannten Möglichkeiten nicht bestehen, wird das Signal gefenstert, um den Leck-Effekt entgegenzuwirken. Dazu stehen genügend Fenster zur Verfügung. Fenster die sich bewährt haben sind z.B. Hamming-, Hann-, Blackman- oder Gaußfenster. Infolge der Fensterung werden der Anfang und das Ende des Signals auf einer Amplitude gehoben. Dadurch entfällt der steile Übergang und die hochfrequenten Anteile verschwinden. Dennoch wird keine ideale Spektrallinie erzeugt, auch wenn Periodensynchron abgetastet wird. Die Fensterung unterdrückt des Weiteren die Amplitude des Signals und somit die Amplitude des Spektrums.

3.3.6 Das Wiener-Chintschin-Theorem

Das Wiener-Chintschin-Theorem betrachtet stationäre stochastische Signale und wie diese im Spektralbereich untersucht werden können. Genauer gesagt wird der Zusammenhang vom Spektral- und Zeitbereich in dem Theorem dargestellt. Dazu wird am Eingang y eines linearen zeitinvarianten Systems (engl. Linear Time-invariant System, LTI-System) ein stochastisches Signal angelegt. Daraus folgt, dass am Ausgang x ebenfalls ein stochastisches Signal entsteht. Das Theorem besagt, dass das Betragsquadrat der Übertragungsfunktion mit der Frequenz ω, die Fourier-Transformierte der AKF vom Ausgang, geteilt durch den Eingang ist [20, p. 200].

$$\frac{\mathcal{F}\{\psi_{yy}(\tau)\}}{\mathcal{F}\{\psi_{xx}(\tau)\}} = \left|\underline{G}(\omega)\right|^2 \tag{3.8}$$

Durch weitere Umformungsschritte [20, pp. 200-202] entsteht folgender Zusammenhang. Die Fourier-Transformierte der AKF ist das Leistungsdichtespektrum (LDS) des Ausgangssignales.

$$\mathcal{F}\{\psi_{xx}(\tau)\} = S_{xx}(\omega) \tag{3.9}$$

Das Frequenzspektrum kann theoretisch, wie in Kap. 3.3.3 beschrieben, mit einer DFT/FFT berechnet werden. Aufgrund der Tatsache, dass die vorliegenden Signale in der Arbeit auf dem Zufall basieren und nicht unendlich lang sind, wird die Berechnung hingegen zu einer ungenauen Schätzung. Mit der FFT konnten zwar frequente Anteile erkannt werden, dennoch ist das Frequenzspektrum verrauscht. Für eine genauere Schätzung wird das Wiener-Chintschin-Theorem genutzt. Indem erst die AKF angewandt wird, führt dies zu einem Mittelungseffekt, der den Rauschanteil weiter unterdrückt [19, p. 466].

3.3.7 Schätzung des Leistungsdichtespektrums

Die Methode zur Schätzung des LDS von stationär stochastischen Signalen wird Periodogramm genannt. Die Berechnung baut auf dem eben genannten Theorem auf. Im ersten Schritt berechnet das Periodogramm die AKF des Signales. Wenn das Signal zeitbegrenzt ist, wird die AKF zu einer Impuls-AKF [20, p. 209] und muss wie ein nicht periodisches Signal behandelt werden. Im weiteren Schritt wird über die Fourier-Transformation das LDS berechnet. Die Abbildung 3.1 sieht dazu vor die DTFT zu verwenden. Als Ergebnis entsteht somit ein frequenzkontinuierliches Spektrum. Aufgrund der Tatsache, dass der PC keine kontinuierlichen Verläufe darstellen kann, wird die DTFT mit der DFT ersetzt. Diese erzeugt wiederum ein diskretes Spektrum, dass sich wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, periodisch fortsetzt. Das Signalfenster wird in dieser Hinsicht als Periode interpretiert. Es gibt weitere Methoden, um die Schätzung des LDS zu erhöhen. Zwei bewährte Verfahren sind die Blackman-Tuckey-Methode und die Welch-Methode [23, p. 119]. Blackman-Tuckey erhöht die Schätzung, indem er die AKF mit einem Blackman-Fenster gewichtet. Das führt zu einer Verringerung der Varianz. Wie das funktioniert wird im Kapitel der Spektralanalyse anschaulich erklärt. Die Welch-Methode hingegen teilt das Signal in überlappende Segmente auf, die jeweils mit einem Fenster gewichtet werden. Das LDS entsteht, indem die modifizierten Periodogramme gemittelt werden [23, p. 118]. Nach der Quelle [23] zu urteilen, ist der Unterschied der Varianzverringerung zwischen den Methoden nur gering. Letztendlich wurde die Blackman-Tuckey Methode gewählt. In Matlab wird dazu der Befehl „periodogram“ zu Verfügung gestellt [24].

3.4 Box-Whisker-Plot

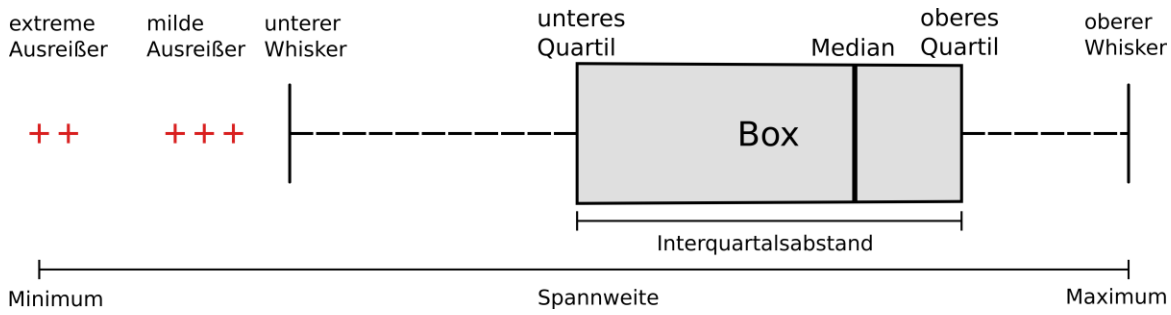

Abbildung 3.5: Darstellung des Box-Whisker-Plot (Vgl. [26])

Wie in der Einleitung beschrieben, stellt der Box-Plot Lage- und Streumaße da. Er basiert auf der robusten Statistik, weil sie widerstandsfähiger gegenüber Ausreißer ist [25]. Anstatt des Mittelwertes wird der Median eingesetzt. Wenn extreme Ausreißer im Signal vorkommen, gewichtet der Mittelwert diese stärker. Die Folge ist, dass der Mittelwert kein repräsentatives Maß darstellt. Der Median hingegen sortiert die Daten in aufsteigender Reihenfolge und nimmt bei einer ungeraden Anzahl den mittleren Wert an. Bei einer geraden Anzahl nimmt der Median den Mittelwert zweier Werte an [25]. Die Ausreißer fallen nicht in die Gewichtung, da sie an der letzten Stelle der Reihenfolge stehen. Die Lage des Medians gibt an, in welchen Bereich sich 50 % der Daten widerspiegeln. Im Interquartalsabstand (engl. Interquartile range, IQR) sind ebenfalls 50 % der Daten enthalten. Er berechnet sich aus der Differenz des oberen und unteren Quartils. Die Höhe der IQR bzw. der Spannweite gibt Auskunft über das Streumaß. Die restlichen 50 % der Daten teilen sich gleichmäßig zu 25 % zwischen den Bereich der Quartilen und den Whsikern auf. Wenn sie kleiner als das 1,5-fache der IQR sind, nehmen die Whsiker das Maximum und das Minimum an. Ausreißer sind größer als das 1,5-fache der IQR und würden somit die neuen Maximal bzw. Minimalwerte bilden. Um die Ausreißer zu kategorisieren, werden alle die größer als das 3-fache der IQR sind, als extreme und alle die sich zwischen den Grenzen vom 3-fachen und dem 1,5-fachen befinden, als milde Ausreißer eingestuft.

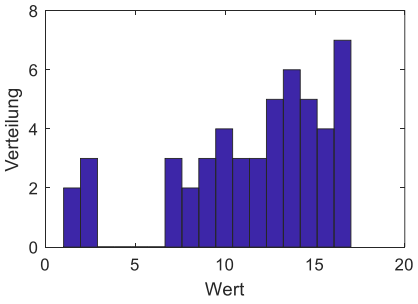

Abbildung 3.6: Histogramm zur Untermauerung des Box-Plot. Daten sind linksverschoben

Mit der zusätzlichen Hilfe von Histogrammen kann die Schiefe und Häufigkeitsverteilung dargestellt werden. Die Interpretation des Box-Plot in Abb. 3.5 könnte folgendermaßen lauten. Anhand des Medians lässt sich zeigen, dass die Daten linksverschoben sind und keiner Normalverteilung entsprechen. Die Daten über halb vom Median kommen dementsprechend häufiger vor. Unterhalb des Medians haben die Daten eine größere Streuung. Zudem sind fünf Ausreißer im Datensatz enthalten. Diese sollten genauer untersucht werden.

4. Datenerhebung

Die zu analysierenden Daten wurden in einer Regenkammer der Firma Lambrecht meteo am 16. November 2021 erhoben. Mit dieser Hilfe konnte die Niederschlagsmenge eingestellt und abgewogen werden. Durch die definierte Niederschlagsmenge bildet sich eine Zugehörigkeit zu der Resonanzfrequenz des Sensors. Im Folgenden wird die App zur Aufnahme der Messdaten und der Versuchsaufbau dargestellt. Zuletzt wird die Vorgehensweise der Messwertaufnahme beschrieben.

4.1 Matlab-App

Um die Messwerte des induktiven Sensors aufzunehmen, grafisch darzustellen und abzuspeichern, wurde eine Matlab-App programmiert. Wie die Messwerte vom Sensor zur Matlab-App gelangen, läuft wie folgt ab. Im ersten Schritt sendet der ESP32 die Daten über ESP-NOW zu einem zweiten ESP32. Dieser ist über eine USB-Verbindung am PC angeschlossen und übermittelt die Daten mit einer separaten seriellen Verbindung an die Matlab-App. Die Programme auf den ESP32 wurden in der Arduino IDE geschrieben. Sowohl die Arduino Programme, als auch das Matlab Programm liegen zur Einsicht im mitgelieferten Ordner „BA_Boedder“.

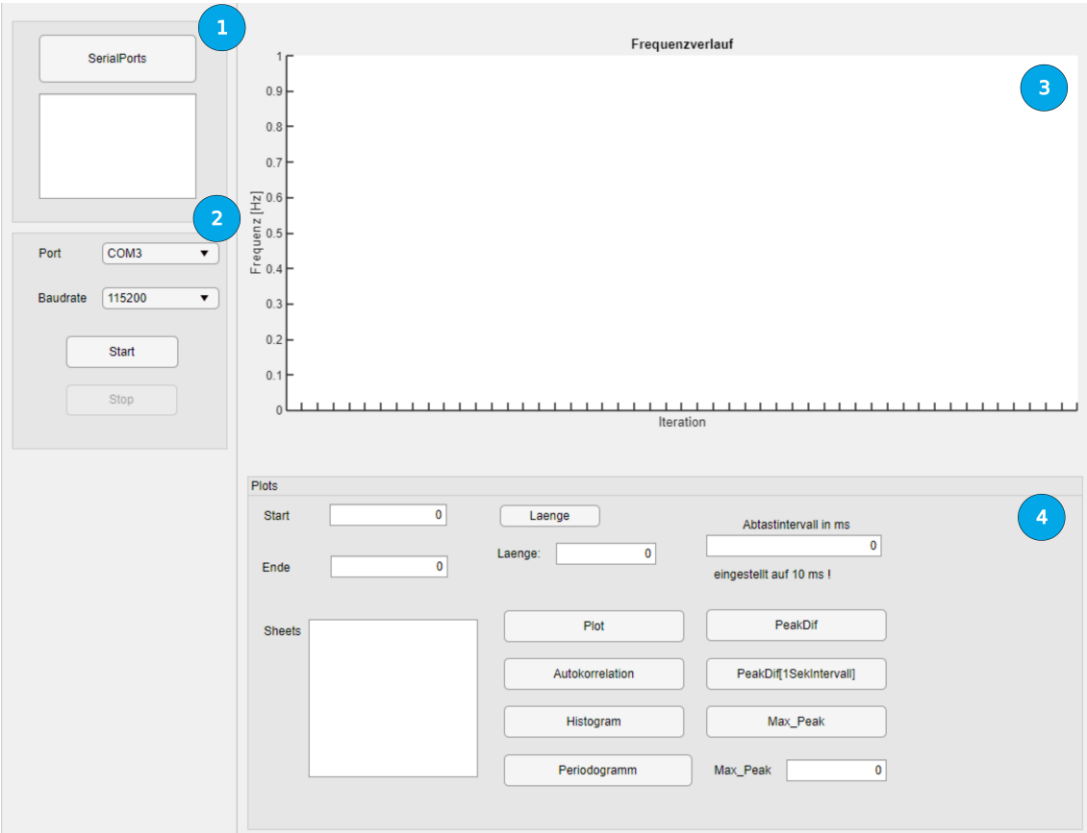

Abbildung 4.1: Oberfläche der Matlab-App in vier Bereichen aufgeteilt

Im ersten Feld kann man über „SerialPorts“ alle zur Verfügung stehenden Communication-Ports (COM-Port) anzeigen lassen. Die Wahl des COM-Port kann danach im zweiten Feld ausgewählt werden. Weiter wird in dem Bereich die Baudrate eingestellt und die Aufzeichnung über den Button „Start“ gestartet. Mit „Stop“ wird die Aufzeichnung beendet und danach in einer Excel- und einer Matlab-Datei gespeichert. Während des Speichervorganges wird ein Zeitstempel zu jedem Messwert hinterlegt. Darüber kann der Datensatz zugeordnet werden. Die Darstellung der Messwerte erfolgt im dritten Feld. Es ist zu beachten, dass die Frequenzwerte hinsichtlich des langen Übertragungsweges eine Verzögerungszeit aufweisen. Die Iteration bestimmt sich über das Abtastintervall zur Messung der Flanken. Für eine erste Auswertung und Analyse der Daten steht der vierte Bereich zu Verfügung. Zwar hatte das Feld am 16. November 2021 weniger Funktionen, dennoch konnten die Datensätze über die „Sheet“-Tabelle ausgewählt und geplottet werden. Die Tabelle zeigt alle abgespeicherten Datensätze mit zugehörigem Datum und Zeitpunkt aus der Excel-Datei an. Mit dem Feld „Start“ und „Ende“ können die Datensätze bei Bedarf zugeschnitten werden. Wenn beispielsweise in den ersten Sekunden nicht gemessen wird, entsteht ein großer Skalierungsfaktor, der weitere Auswertungen erschwert. Die anderen Funktionen wurden nach der Messung bei Lambrecht in Laufe der Zeit hinzugefügt. Über „PeakDif“ können beispielsweise die Peak Differenzen von zwei aufeinanderfolgenden Werten dargestellt werden.

4.2 Versuchsaufbau

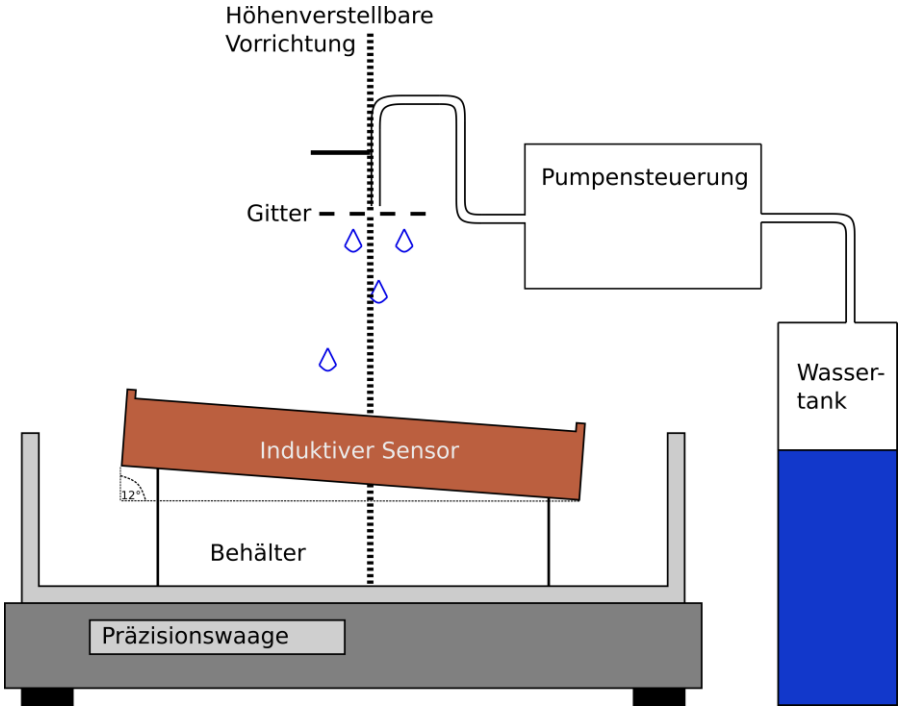

Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Regenkammer

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau und die Funktion der Regenkammer erläutert. Das destillierte Wasser wird über eine Pumpensteuerung aus dem Behälter hochgepumpt und mittels einer Vorrichtung über den Sensor verteilt. Die Vorrichtung besteht aus einer vertikalen Stange, an der ein flexibler Schlauch mit einem runden Ausgang angebracht ist. Die Höhe kann über eine Kurbelvorrichtung eingestellt werden. Damit das Wasser breitflächiger auf die Membran landet, wurde ein Gitternetz unter die Öffnung gehalten. Das Netz hat dafür gesorgt, dass sich der Wasserstrom zu Tropfen geformt hat. Einstellungen der Niederschlagsmenge finden an der Pumpensteuerung statt. In der ersten Messung betrug die Niederschlagsmenge 100 ml pro Minute. Nachdem das Wasser auf die Membran gefallen ist, läuft es aufgrund der Schieflage in den Behälter. Der Behälter steht auf einer Präzisionswaage, die bei jeder erneuten Messung die Masse des Wassers messen kann.

4.3 Messwertaufnahme und Vorgehensweise

Zur Auswertung wurden zwei Spulen verwendet, die vorher mit der Messeinrichtung auf ein ausreichendes Signalergebnis getestet wurden. Das bedeutet ein signifikanter Frequenzausschlag beim Auftreffen eines Wassertropfens (siehe Abb. A.9). Dazu wurde ein bestimmter Abstand zur Membran eingestellt und ein 560 pF Kondensator parallel zur Spule verschaltet. Der Abstand konnte Aufgrund des Aufbaus der Messeinrichtung nicht bestimmt werden. Das Abtastintervall betrug 10 ms. Des Weiteren hat jede Spule seine eigene Messeinrichtung mit Gehäuse und Mikrocontroller erhalten. Mit der ersten Spule Alpha wurden 10 Messreihen aufgenommen. Gestartet von 100 ml bis auf 10 ml. Bei der zweiten Spule Beta wurden aus zeitlichen Gründen 5 Messreihen aufgenommen. Gestartet bei 100 ml bis 20 ml in 20ger Schritten. Die letzte Messung bestand aus einer Kurvenmessung. Das bedeutet, dass die Pumpensteuerung kontinuierlich über die Zeit von 10 ml auf 130,5 ml und wieder auf 10 ml per Hand eingestellt wurde. Folgende Beobachtungen sind während des Versuches aufgefallen.

- Zwischen den Messwertaufnahmen ist das Wasser nicht vollständig abgelaufen.
- Es hat kein Neustart der Mikrocontroller stattgefunden.
- Es hat keine Veränderung der Position des Schlauches stattgefunden.
- Die Messzeit jeder Aufnahme ist unterschiedlich, da bis zu einem bestimmten Gewicht des gefallenen Niederschlages gemessen wurde.
- Zu Beginn jeder Messung wurde einige Sekunden Rauschen gemessen, da der Regen nicht sofort gefallen ist.

Messung	Niederschlagsmenge in ml	
	Spule Alpha	**Spule Beta**
M1	100	100
M2	90	80
M3	80	60
M4	70	40
M5	60	20
M6	50	
M7	40	
M8	30	
M9	20	
M10	10	
M11	10 -> 130,5 -> 10	10 -> 130,5 -> 10

Tabelle 4.1: Messwertaufnahmen aus der Regenkammer

Die Tabelle zeigt alle Datensätze von M1 bis M11 in Bezug auf die Niederschlagsmenge. In der Arbeit werden die Messungen mit dem Buchstaben M und der jeweiligen Nummer abgekürzt. Wenn zudem die Spule hinzukommt, wird der Kürzel α oder β verwendet. Anstatt Messung 100 ml und Spule Alpha, wird M1α geschrieben.

5. Ergebnisse

In der Messreihen Analyse wird untersucht, wie das Messystem auf unterschiedliche Niederschlagsmengen reagiert (M1α-M10α und M1β-M5β). Hierzu werden Kennwerte, Tabellen und Abbildungen erstellt, um Verhaltensweisen des Systems zu verdeutlichen und darzulegen. Dazu eignet sich unter anderem der Box-Whikser-Plot mit Unterstützung von Histogrammen. Im zweiten Unterkapitel der Peak-Differenz Analyse wird auf eine Optimierung der bisherigen Auswertungsmethode eingegangen. Es wird aufgezeigt, warum eine Auswertung über die Änderung der Resonanzfrequenz keine Verbesserung bewirkt, die Peak-Differenz-Methode (PD-Methode) hingegen schon. Als Datensatz wird die elfte Messung bzw. die Kurvenmessung ausgewertet. An ihr ist das Ergebnis ersichtlicher. Zudem zeigt sich, welche Spule besser für die PD-Methode geeignet ist. Als Ergebnis wird eine Kurve in Glockenform erwartet. Mit Hilfe des Periodogramms werden in der Spektralanalyse frequente Anteile untersucht und mit der Autokorrelation wird die Problematik der Ausreißer dargelegt. Insgesamt sollen mit dem fünften Kapitel folgende Fragen in der Zusammenfassung beantwortet werden.

1. Liefert das System eine ausreichende Antwort auf den Niederschlag?
2. Kann über die Resonanzfrequenz der Niederschlag zugeordnet werden?
3. Welche Spule ist besser zur Auswertung des Niederschlages geeignet?

Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass man für eine aussagekräftige Analyse ergodisch stationäre stochastische Prozesse benötigt. Während jeder erneuten Messung wurde die Membran nicht vom Wasser aus der vorherigen Messung befreit. Aus diesem Grund hat sich der Erzeugungsmechanismus verändert und der Prozess verliert sowohl seine Stationarität, als auch seine Ergodizität. Auch die Anzahl der Musterfunktionen ist zu niedrig, um eine aussagekräftige und statistische Analyse in Hinblick auf Standardabweichungen und Wiederholbarkeit durchzuführen. Dennoch können die Fragen mit den vorhandenen Datensätzen weitestgehend beantwortet werden.

5.1 Datenanalyse und -auswertung der Messreihen

Im Kapitel 5.1.1 wird darauf eingegangen, wie das Messystem auf unterschiedliche Niederschlagsmengen reagiert. Dazu wird die erste Frage mit folgenden Erwartungen verknüpft.

1.a Detektion der Regentropfen.
1.b Erhöhter Niederschlag führt zu erhöhter Resonanzfrequenz.
1.c Gleichbleibende Niederschlagshöhe führt zu gleichbleibende Resonanzfrequenz.

Die Detektion der Regentropfen (1.a) ist entscheidend, um die Masse der Regentropfen zu ermitteln. In dieser Hinsicht wird angenommen, dass die Masse über die Höhe der Amplitude des Frequenzausschlages berechnet werden kann. Die zweite Erwartung (1.b) baut auf den theoretischen Grundlagen auf. Wenn der Niederschlag erhöht wird, kommt es zu einer Zufuhr an Wasser auf der Membran, die dementsprechend eingedrückt wird. Infolgedessen verkürzt sich der Abstand zur Spule und die Resonanzfrequenz wird größer. Bei leichtem Niederschlag wird die Resonanzfrequenz hingegen kleiner. Wenn die Niederschlagsmengen wie in Tabelle 4.1 eingestellt und der Reihe nach, gemessen werden, erwartet man untereinander gereihte Funktionen der Resonanzfrequenzen. Der letzte Punkt (1.c) beinhaltet, dass die Funktionen der Resonanzfrequenzen im Idealfall eine horizontale Gerade bilden, wenn der Niederschlag gleichbleibt. Aufgrund der Tatsache, dass die Messeinrichtung nicht ideal ist, wird die Erwartung auf geringe Schwankungen und niedrige Rauscheinflüsse erweitert. Insgesamt sollte der Datensatz einer Normalverteilung folgen.
Die Signale wurden in diesem Unterkapitel nicht vorgefiltert. Es soll zuerst ein Eindruck gewonnen werden, wie die Messeinrichtung arbeitet und welche Verhaltensweisen zu Problemen führen. Da in den ersten Sekunden keine Messung von Regen stattgefunden hat, wird dieser Abschnitt für den Box-Plot rausgeschnitten. In den anderen Plots wird das Ende der Signale auf ein einheitliches Maaß gebracht. Somit können die Funktionen in einen Plot dargestellt werden.

5.1.1 Analyse der Spulen Alpha und Beta

Anhand des Box-Plot der Spule Alpha und Beta, sowie der zugehörigen Tabelle A.1, lassen sich erste Informationen sammeln. Die Abbildung 5.1 zeigt die Messungen 1-10 der Spule Alpha. Nach den ersten Beobachtungen lässt sich sagen, dass jede Messung (außer M1α) mehrere milde und extreme Ausreißer besitzt. Die Anzahl der Ausreißer entspricht im Mittelwert 122. Davon sind 15 extreme Ausreißer. Die IQR von M1α ist mit 4.700 Werten am größten. Dies lässt sich am Plot des aufgenommenen Signales erkennen (siehe Abb. A.3). Die Frequenz startet im untersten Bereich und nimmt gegenüber den anderen Signalen einen deutlich steileren Verlauf über die Messzeit an. Demnach ist die Bandbreite der Frequenz am größten. Die IQR von M5α bis M10α sind im Gegensatz zu den anderen Messreihen geringer und deuten somit auf eine weniger schwankende Resonanzfrequenz hin (geringere Streuung). Die Höhe der IQR von M5α bis M10α geht von 400 bis 800 Frequenzwerten. Zudem sind einige Messungen links- oder rechtsschief. Das zeigt der verschobene horizontale Strich vom Median, sowie die Histogramme (siehe Abb. A.5). M2α, M3α und M9α sind linksschief. M4α, M8α und M10α sind rechtsschief. M5α, M6α und M7α kommen einer Normalverteilung nahe.

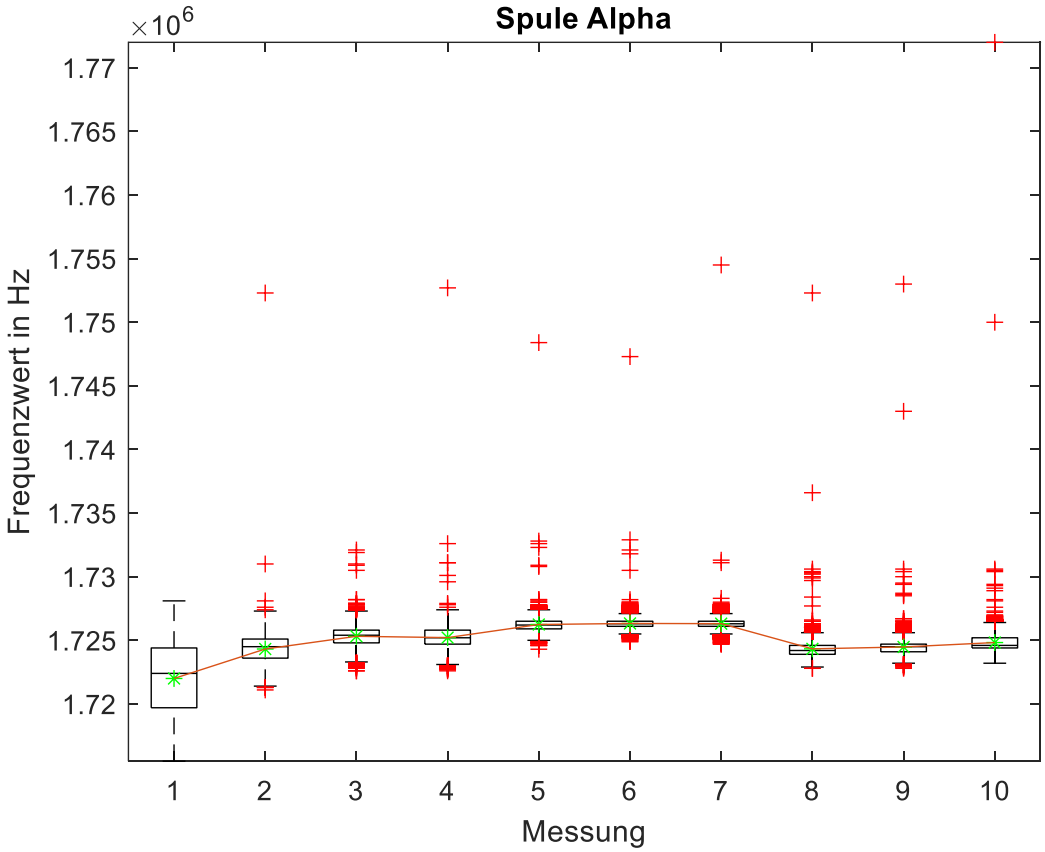

Abbildung 5.1: Messwerte der Spule Alpha. Die Frequenzwerte sind im Box-Plot dargestellt, Mittelwerte als grüner Stern, Median als horizontale Linie und Ausreißer als rotes Kreuz.

Wenn die Resonanzfrequenz mit einer geringen Standardabweichung auf dem gleichen Level bleiben würde, könnte man am Mittelwert ablesen, ob die Resonanzfrequenz bei starkem Niederschlag den größten Wert hat. Da hingegen M1α eine große IQR besitzt, kann diese Methode nicht angewendet werden. Somit wird die Erwartung 1.b und 1.c mit den Plots aus Abb. 5.2 und Abb. 5.4 analysiert. Diese zeigen die Polynomfunktion der Messwertaufnahmen mit der Ordnung von 10. Außerdem wurden nicht 10 sondern 5 Messreihen für einen verbesserten Überblick dargestellt. Die Anzahl ist für eine Analyse der Trendentwicklung ausreichend.

Auf den ersten Blick lässt sich leicht erkennen, dass die Kurven mit dem höchsten Niederschlag nicht oben anfangen und sich dann untereinander reihen. M1α (blau) startet am untersten Frequenzpunkt und geht steil nach oben, bis sie über M9α (grün) endet. Auch M3α (orange) siedelt sich nicht im oberen Bereich an. Stattdessen startet sie als zweitniedrigster Wert und endet oberhalb von M1α. Die Kurven von M5α (gelb) und M7α (lila) befinden sich in der oberen Hälfte und kreuzen sich an mehreren stellen. Diese sollten sich in der Theorie unterhalb von M3α und M1α befinden. Die Messung mit dem geringsten Niederschlag M9α startet als höchster Wert. Der Endpunkt befindet sich unterhalb aller anderen Messreihen. Das ist der einzige Wert, der den theoretischen Grundlagen von 1.b entsprechen würde. Wenn alle Polynome analysiert werden, zeigt sich, dass M10α insgesamt als letzter Wert endet (siehe Abb. A.7).

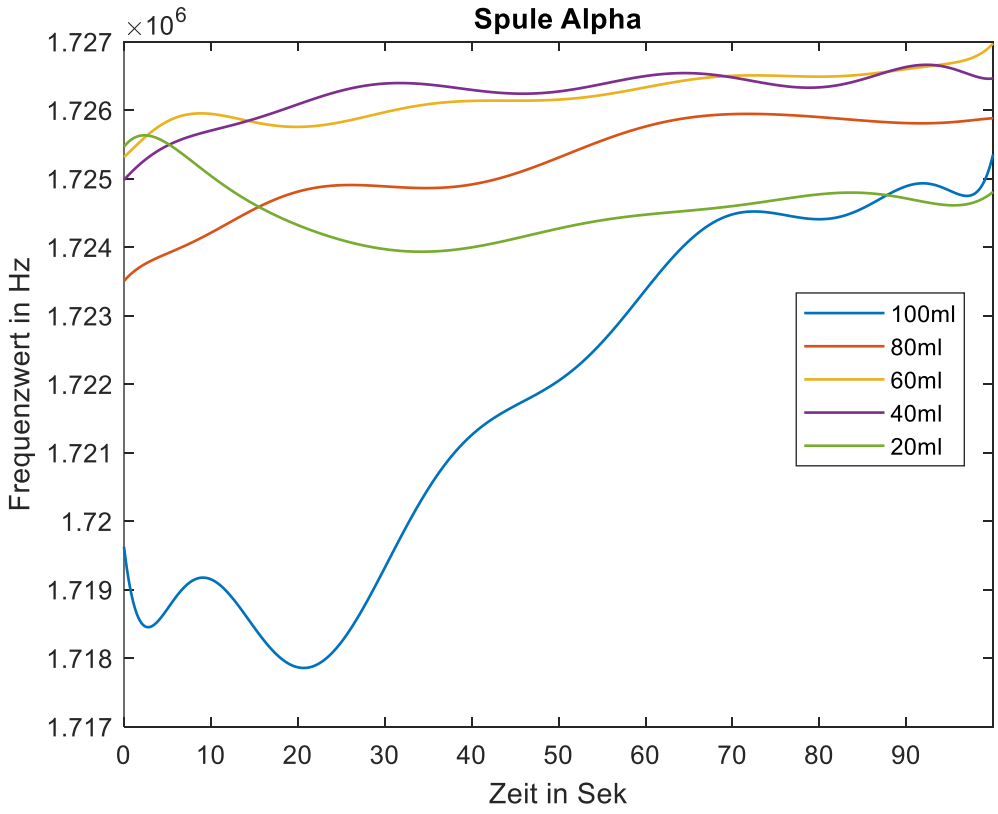

Abbildung 5.2: Polynomfunktion der Signale (gerade Anzahl) von Spule Alpha. Niederschlagsmengen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

Im Folgenden werden die Messreihen 1 bis 5 der Spule Beta im Box-Plot dargestellt. Die aufgenommenen Signale befinden sich wie bei der Spule Alpha im Anhang (siehe Abb. A.4). Mittels des Box-Plot lassen sich erste Eindrücke gewinnen. In diesem Fall hat, anstatt der ersten Messung, die zweite Messung die größte IQR. In dieser liegen 27.250 Werte. Ein Großteil dieser Daten befinden sich im oberen Frequenzbereich, wodurch die Ausreißer allesamt negativ sind. Das Phänomen kann ebenfalls mit der großen Bandbreite der Frequenz in Zusammenhang gebracht werden. Im Vergleich zu den anderen Messungen haben M3β und M5β eine geringe IQR. Mit 4.300 bis 4.400 Werten entspricht das ca. 5,7 % der maximalen IQR von M2β. Des Weiteren sind in jeder Messung Ausreißer enthalten. Insgesamt liegen diese im Mittel bei 527, wovon 72 als extreme Ausreißer bezeichnet werden. Im Gegensatz zu den anderen Messreihen, kommen M3β und M5β einer Normalverteilung nahe. M1β und M4β hingegen sind rechtsschief. M2β ist linksschief (siehe Abb. A.6).
Zuletzt muss erwähnt werden, dass durch die große Bandbreite der Frequenzen von M1α und M2β die Anzahl der Ausreißer unterdrückt wird.

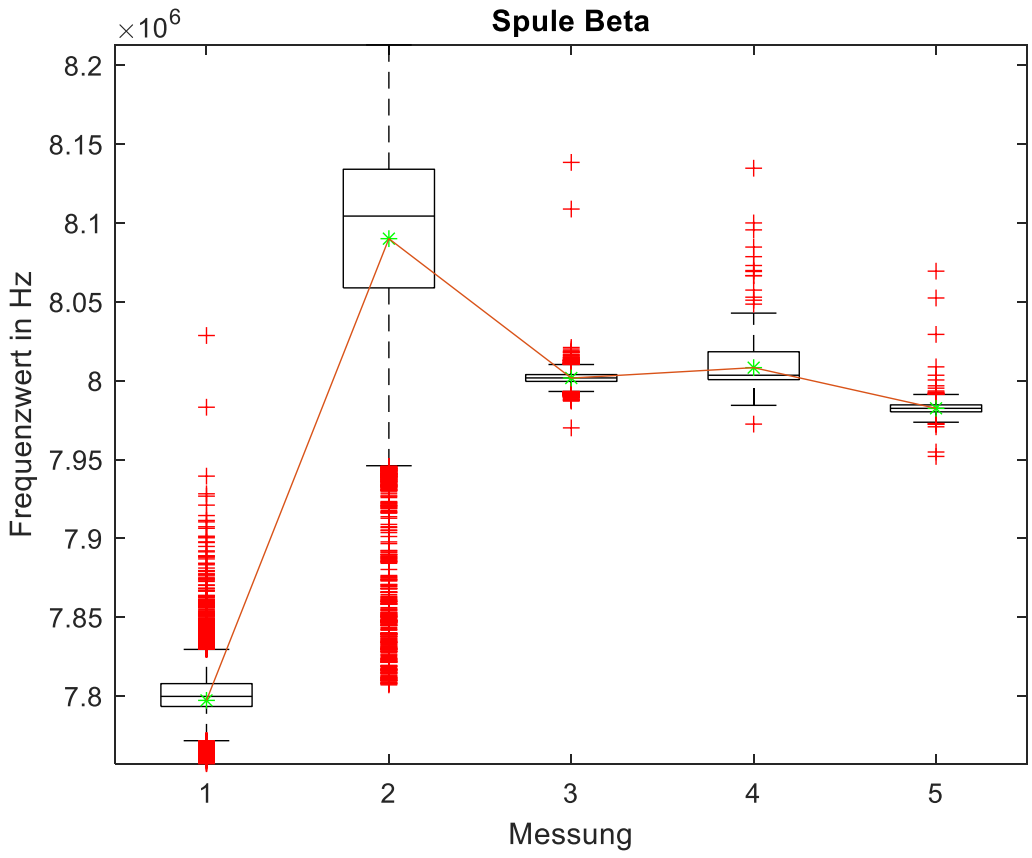

Abbildung 5.3: Messwerte der Spule Beta. Die Frequenzwerte sind im Box-Plot dargestellt, Mittelwerte als grüner Stern, Median als horizontale Linie und Ausreißer als rotes Kreuz.

Die Messung mit dem größten Niederschlag M1β (blau) startet wie bei der Spule Alpha am untersten Frequenzpunkt. Danach hingegen bleibt die Kurve im unteren Bereich. M2β (orange) weißt ein ähnliches Verhalten wie M1α auf. Sie startet in diesem Fall als zweitletzte, steigt stark an und endet als höchster Messwert. Der Endpunkt würde der Theorie von 1.b am ehesten nachkommen. Die Messung mit dem niedrigsten Niederschlag M5β (grün) findet sich mittig wieder und würde zum Endpunkt, ohne M1β der dahinterstehenden Theorie entsprechen. Auch die Messungen M3β (gelb) und M4β (violett) stimmen vom Start und Endpunkt mit der Theorie überein. Dennoch kreuzen sie sich an mehreren Stellen.

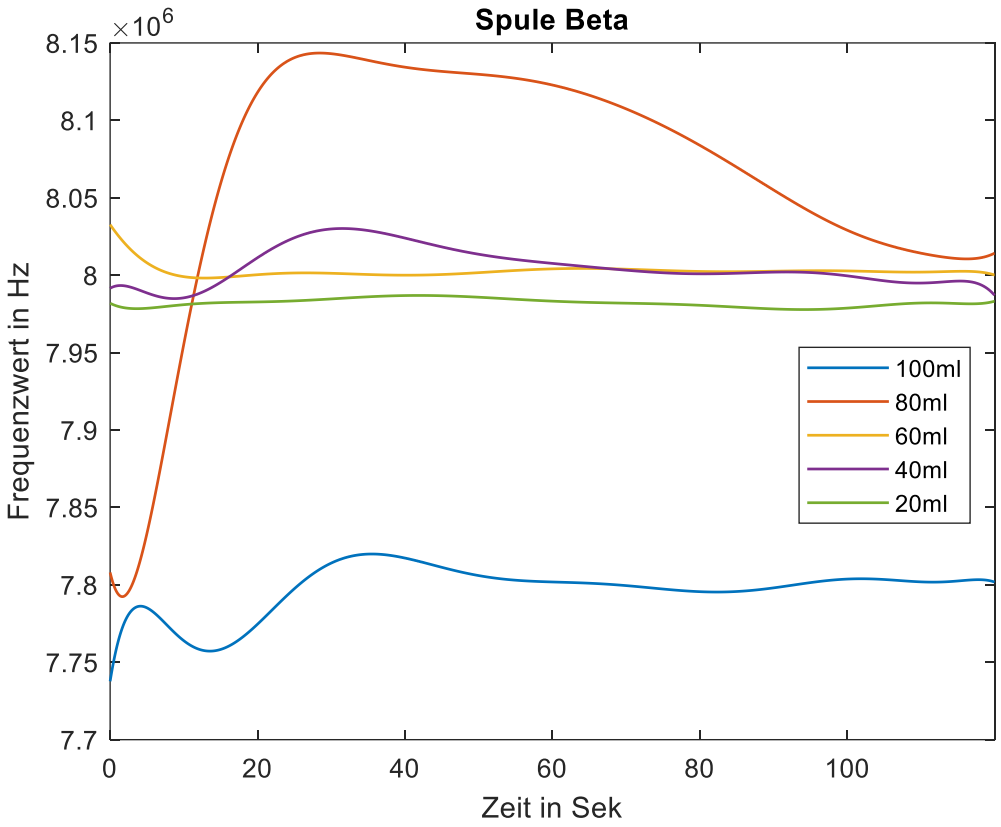

Abbildung 5.4: Polynomfunktion der Signale von Spule Beta. Niederschlagsmengen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

Im Folgenden wird das Rauschen des Systems analysiert. Abbildung 5.5 zeigt das Verhalten des Systems der Spule Alpha in den ersten 5 Sekunden. In dieser Zeit ist kein Regen auf die Membran gefallen. Man betrachtet demnach das Rauschen des Systems. Zur Veranschaulichung wurden wieder 5 Messreihen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Signale um wenige 100 Hz rauschen und keine Schwankungen aufweisen. Für die Übersicht wurde eine Tabelle mit den Median- und den Mittelwerten der Messreihen 1 bis 10 in den Anhang gelegt (siehe Tabelle A.3). Der Median soll indes Ausreißer unterdrücken. Als Ergebnis hat sich eine Bandbreite von 0 Hz bis 200 Hz des Medians ergeben. Von den 10 Messreihen haben 7 Messreihen einen Median von 0 Hz. Der Mittelwert

des Medians liegt bei 40 Hz. Auf den Mittelwert der Resonanzfrequenz von 1,7 MHz bezogen wären dies 0,00235 %.

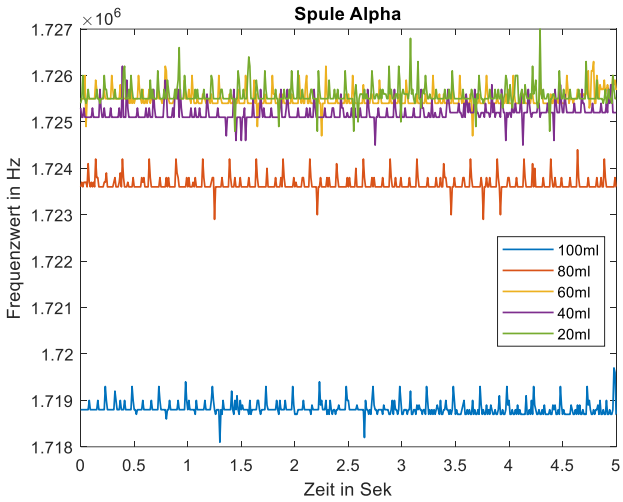

Abbildung 5.5: Zeitlicher Ausschnitt des Datensatzes der Spule Alpha (gerade Anzahl). Es zeigt das Rauschen ohne Einfluss von Regen. Niederschlagsmengen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

Bei der Spule Beta hingegen erkennt man ein extremeres Verhalten des Rauschens, weil die Signale erheblich mehr und größere Peaks haben. Die Tabelle mit dem Median unterstützt die Annahme (siehe Tabelle A.3). Die Bandbreite des Medians liegt bei 600 Hz bis 4.400 Hz und beträgt im Mittel 1.740 Hz. Das entspricht nicht dem Rauschen der Spule Alpha. Auf 8 MHz bezogen wäre der Anteil 0,0218 %.

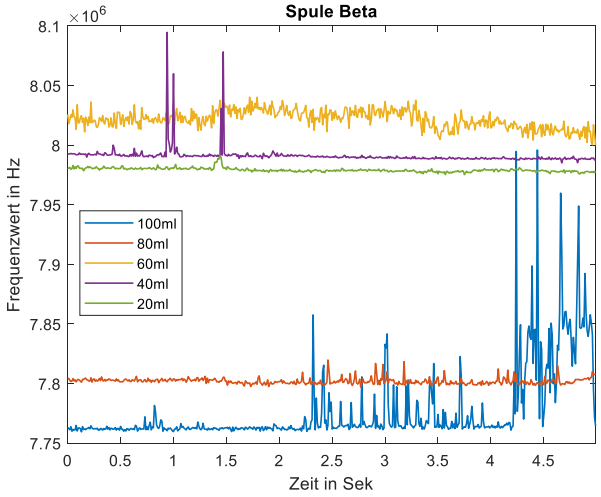

Abbildung 5.6: Zeitlicher Ausschnitt des Datensatzes der Spule Beta. Es zeigt das Rauschen ohne Einfluss von Regen. Niederschlagsmengen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

5.1.2 Vergleich der Spulen Alpha und Beta

Spule	Mittelwert und Standardabweichung in Hz			
	Median	**IQR**	**Differenz**	**Ausreißer**
Alpha	1.724.270 ± 2.880	4.070 ± 1.159	23.740 ± 11.738	122 ± 115
Beta	7.978.410 ± 90.352	83.600 ± 24.241	176.250 ± 69.507	527 ± 693

Tabelle 5.1: Vergleich der Spulen Alpha und Beta anhand von Kennwerten aus dem Box-Plot.

Die Tabelle gibt die Mittelwerte mit Standardabweichungen der Kenndaten wieder. Aus den Ergebnissen in der ersten Zeile geht hervor, dass die Kennwerte der Spule Alpha deutlich geringer ausfallen. Das Verhalten überträgt sich auf alle Spalten. Die IQR von Alpha ist um 95 % geringer als die der Spule Beta. Das bedeutet eine deutlich geringere Streuung der Werte. In der dritten Spalte wird die Differenz vom Median bis zum maximalen Ausreißer angegeben. In dieser Kategorie beträgt der unterschied von Spule Alpha auf Beta 86,6 %. Auch die Anzahl der Ausreißer sind in der Spule Alpha um 76,9 % geringer. Zudem ist der mittlere Rauschanteil der Spule Beta um 97,7 % größer.

5.1.3 Diskussion der Datenanalyse

Verhaltensweisen

Zwei Verhaltensweisen sind durch die Messwertaufnahmen deutlich aufgefallen. Zum einen die hohe Bandbreite an Frequenzwerten (siehe M1α, M2β) und zum anderen die signifikante Anzahl an Ausreißern. Es wird angenommen, dass die Ausreißer nicht durch Regentropfen, sondern durch die Hardware und/oder Software entstanden sind. Der Grund für die Annahme wird im Kapitel der Spektralanalyse behandelt. Die steilen Anstiege (siehe M2β) kommen durch eine erhöhte Wasserzufuhr auf der Membran zustande, die den Abstand stark verringert. Aufgrund des Dichtungsringes von 5,5 mm sammelt sich das Wasser über einen bestimmten Zeitraum, bis es schlagartig abfließt. An den Kurven lässt sich dieses Verhalten durch eine stark abnehmende Resonanzfrequenz erkennen. Zusätzlich verfälscht das Wasser auf der Membran bei jeder erneuten Messung die Messwerte, da die Membran nicht gesäubert wurde. Somit starten einige Messungen mit einem starken An- oder Abstieg der Resonanzfrequenz. Langzeitige Signalschwankungen entstehen aufgrund von Temperaturänderungen. Im Praxissemesterbericht von M. Batalla wird aufgezeigt, dass die Resonanzfrequenz nach unten abdriftet, wenn die Temperatur nach oben geht. Geringe Signalschwankungen können wiederum vom Wasser Zu- und Abfluss auf der Membran, als auch von äußeren kapazitiven Einflüssen, sowie von Erschütterungen entstehen. Bei der Durchführung von Einzelversuchen im Labor konnte je nach Konfiguration der Messeinrichtung (bezogen auf die Sensibilität), Bodenerschütterungen festgestellt werden. Auch in der Regenkammer wäre dies möglich gewesen. Es zeigte sich auch, dass das System von der parasitären Kapazität beeinflusst wird.

Dieser Einfluss verstärkt sich, wenn man z.B. seine Hand in die Nähe der Membran bewegt. Die Gesamtkapazität des Systems verändert sich, da die Hand eine zusätzliche Kapazität parallel zur Membran und Spule bildet. Während der Versuche in der Regenkammer wurde ein Gitternetzt über die Membran gehalten. Somit könnte auch dieses Verhalten in den Signalen enthalten sein.

Der Hauptteil des Rauschens entsteht durch die fehlerhafte Flankendetektion des PCNT und dem nicht idealen Schwingkreis. Wenn der PCNT sich um zwei Flanken verzählt kommt ein Rauschen von 100 Hz zustande, weil in der nachstehenden Berechnung durch den Faktor 2 geteilt wird. In Abbildung 5.5 ist das Phänomen deutlich zusehen. Es ist nicht auszuschließen, dass Umgebungsbedingungen den Rauscheinfluss verstärken. Dazu zählen:

- Umgebungstemperatur
- Temperatur des Wassers auf der Membran
- Kapazitive Einflüsse

Die Theorie von umgebungsbedingten Rauscheinflüssen ist an der Spule Beta (siehe Abb. A.4) ersichtlich. M1β (blau) zeigt, dass nach 4 Sekunden eine Zufuhr des Niederschlages stattfindet. Davor jedoch deutet das Signal nicht auf ein Rauschen von 100 Hz hin. Nach den bisherigen Erkenntnissen kann angenommen werden, dass die Spule Alpha robuster und die Spule Beta empfindlicher gegenüber den Umgebungseinflüssen ist. Die Auswirkung von kapazitiven Einflüssen wird in der Bachelorarbeit von M. Batalla untersucht. Erste Messungen ergaben, dass, je höher die Resonanzfrequenz der Spule, umso größer die Empfängnis von kapazitiven Anteilen. Die Messergebnisse untermauern demnach die Annahme mit der Begründung, dass der Mittelwert der Resonanzfrequenz von Spule Beta (8 MHz) deutlich größer ist, als der von Spule Alpha (1,7 MHz).

Detektion von Regentropfen

Die Erwartung 1.a wurde vor der Messwertaufnahme bei Lambrecht ohne Einfluss von Regen sichergestellt. Aus der Abb. A.9 ergibt sich, dass bei jedem Tropfeneinschlag signifikante Frequenzausschläge stattfinden. Zudem bestätigt sie, dass bei einem Abtastintervall von 10 ms eine Reaktion hervorgerufen wird. Daraus lässt sich schließen, dass das System schnell genug reagiert um zeitlich zufällig fallende Tropfen zu erkennen. Wie soeben geschrieben, liegt die Auflösung bei 100 Hz, wenn das Abtastintervall 10 ms beträgt. Zur Wiederholung, es werden alle 10 ms ein Frequenzwert auf Basis der gezählten Flanken ausgegeben. Pro 1 Sekunde können demnach maximal 100 Regentropfen gezählt werden. Wenn hingegen die Flanken in einem Intervall von 1 ms abgetastet werden, steigt die Auflösung auf 1.000 Hz. Die Reaktionszeit erhöht sich und es können bei einer starken Regenintensität, in der gleichen Zeit, mehr Tropfen detektiert werden. Äußere Einflüsse, wie Erschütterungen, werden in kürzerer Zeit mit einer stärkeren Steigung aufgenommen.

Weiterhin erhöht sich der Rauschanteil im Signal. Im Gegensatz dazu sinkt der Rauschanteil, wenn das Abtastintervall größer wird und das System dementsprechend Träger reagiert. Falls die Abtastzeit z.B. auf 1 Sekunde eingestellt ist, sinkt der Faktor ebenfalls auf 1. In einer Sekunde kann demnach maximal ein Regentropfen gezählt werden.

Die Frequenzausschläge der Regentropfen können in den Datensätzen nicht eindeutig detektiert werden. Es wird angenommen, dass ein Signalgemisch aus Ausreißern, Tropfen und Grundrauschen besteht. Das Grundrauschen ist bei der Spule Alpha zu gering, um die Tropfenausschläge zu überlagern. Bei der Spule Beta hingegen wird angenommen, dass das Grundrauschen einen höheren Einfluss auf die Ausschläge hat. Ausreißer können ein weiterer Grund dafür sein, warum die Regentropfen nicht erkannt werden. Sie sind deutlich größer und überlagern demnach das Nutzsignal. Eine andere Ursache, warum die Tropfen nicht ausgemacht werden können, ist die Sensibilität bzw. Empfindlichkeit des Systems. Einstellbar aus der Spule, dem Abstand zur Membran und dem parallelen Kondensator. M5α-M10α hatten einen leichten Niederschlag und eine geringe Bandbreite der Frequenzen. Das weist auf eine zu niedrige Sensibilität hin, um die Regentropfen zu detektieren.

Erhöhter Niederschlag führt nicht zu einer erhöhten Resonanzfrequenz

Durch die Analyse der Polynomfunktionen in Abbildung 5.2 stellt man fest, dass die Spule Alpha nicht der Erwartung von 1.b nachkommt. Die Funktionen weisen keinen signifikanten Abstand auf und liegen im Allgemeinen übereinander (siehe Abb. A.7). Einen höheren Anteil an der Theorie hat hingegen die Spule Beta (siehe Abbildung 5.4). Bei ihr konnten erste Verhaltensweisen festgestellt werden, dass die Resonanzfrequenz steigt, wenn sich die Membran der Spule annähert. Eine Verbesserung der Ergebnisse würde eventuell durch eine längere Messzeit kommen. Nach dem Trend der Signale zu urteilen, müssen sich einige Resonanzfrequenzen erst einschwingen. M1α zeigt z.B. einen steilen Anstieg nach oben (siehe Abb. 5.2).

Gleichbleibender Niederschlag führt nicht zu einer gleichbleibenden Resonanzfrequenz

Die Erwartung einer gleichbleibenden Resonanzfrequenz (siehe 1.c) trifft im strengen Sinne auf keine der Spulen zu. Jedes Signal hat einen gewissen Anteil an Schwankungen. Das zeigt die Höhe der IQR, sowie der verschobene Median im Box-Plot. Untermauert wird das Verhalten durch die Verteilung der Frequenzwerte im Histogramm. (siehe Abb. A.5 und Abb. A.6) Wenn auf Rauschen und geringfügige Schwankungen erweitert wird, erfüllen die Messreihen M5α bis M7α und M3β, sowie M5β die Erwartung. Diese Messreihen sind nicht Links- oder Rechtsschief, haben die niedrigsten IQR und die kleinsten Standardabweichungen. Das deutet auf eine geringe Streuung hin (siehe Tabelle A.1 und Tabelle A.2).

5.2 Datenanalyse und -auswertung der Peak-Differenz Methode

In diesem Kapitel wird die zweite Fragestellung - Kann über die Resonanzfrequenz der Niederschlag zugeordnet werden? - thematisiert. Über den direkten Weg der Änderung der Resonanzfrequenz erschwert sich die Zuordnung. Aus den bisherigen Ergebnissen geht hervor, dass Wassermengen auf der Membran und äußere Einflüsse die Beschaffenheit des Systems signifikant verändern. Das führt zu einer stetigen Verfälschung der Messwerte und sprungartigen Veränderungen der Resonanzfrequenz. Die alternative Lösung ist der indirekte Weg. In diesem wird die Differenz von zwei aufeinanderfolgenden Frequenzwerten genommen. Zu der Methode wird folgende Theorie aufgestellt. Die Niederschlagsmenge kann auf zwei Arten zustande kommen. Entweder sind die Tropfen bezogen auf eine niedrige Intensität größer bzw. schwerer oder die Tropfen sind kleiner und die Intensität nimmt zu. Im Versuchsstand kann angenommen werden, dass die Tropfen bei erhöhtem Durchfluss größer werden und die Intensität der Tropfen zunimmt. Im zweiten Schritt werden die Peak Differenzen in einem bestimmten Intervall ausgerechnet und über diesen gemittelt. Wenn die Intensität zunimmt, entstehen mehr Ausschläge, bezogen auf ein bestimmtes Intervall. In diesem Intervall werden demnach eine größere Anzahl an Differenzen vorkommen und der Mittelwert würde sich erhöhen. Der Gegensatz dazu wäre kein Niederschlag. Im Idealfall sollte sich eine gleichbleibende Resonanzfrequenz ergeben, wenn es nicht regnet. Das Ergebnis der PD-Methode wäre demnach eine Nulllinie. Aufgrund der Tatsache, dass der Schwingkreis nicht dem Ideal entspricht und der PCNT die Flanken nicht adäquat genug detektiert, kommt es dennoch zu Rauschen.
Die PD-Methode würde nicht nur die Intensität, sondern auch die Masse des Tropfens über den erhöhten Ausschlag auswerten. Je größer die Ausschläge in einem bestimmten Intervall, umso größer die Peak-Differenzen und somit auch der Mittelwert. Anstatt des Mittelwertes könnte auch der Median genutzt werden. Wenn das System funktioniert und etwaige Ausreißer nicht mehr vorkommen, ist der Mittelwert vorzuziehen.

5.2.1 Vergleich der Spulen Alpha und Beta

Um den ersten Ansatz der Methode zu analysieren, werden die Peak-Differenzen jeder Messreihe ausgerechnet und der Mittelwert gebildet. Aus der Theorie sollte der Mittelwert mit dem kleinsten Niederschlag unten liegen und dann sukzessiv pro Messung größer werden. Um die dritte Frage zu beantworten, werden die Spulen Alpha und Beta verglichen.
Aus der Abbildung 5.7 geht hervor, dass die Erwartung mit der Theorie übereinstimmt. Die Messung mit dem kleinsten Niederschlag (M10α) hat den kleinsten Mittelwert. Danach nehmen die Mittelwerte pro Messung zu. Der Verlauf hingegen ist nicht linear.

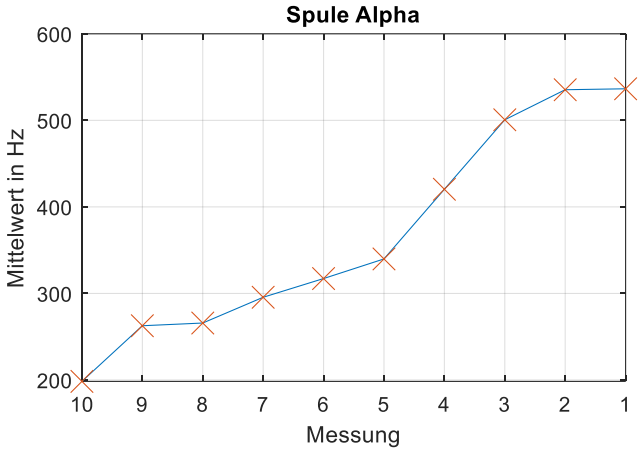

Abbildung 5.7: Mittelwerte (orangenes Kreuz) der PD-Methode von M1α – M10α.

Die Spule Beta zeigt bis auf Messung 2 das gleiche Verhalten. Als Anmerkung sollte erwähnt werden, dass der Plot bei 5 Messreihen keine starke Aussagekraft besitzt.

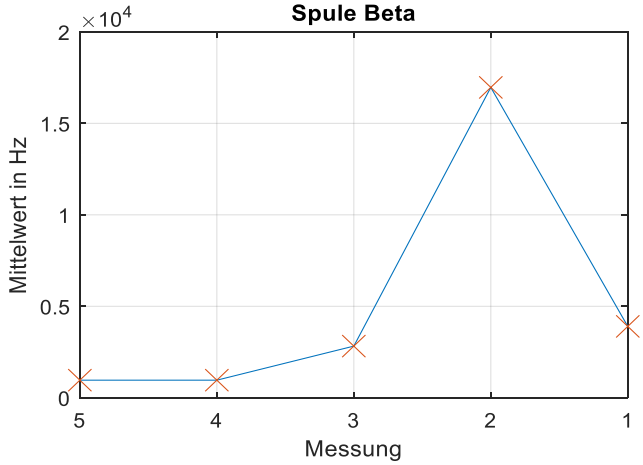

Abbildung 5.8: Mittelwerte (orangenes Kreuz) der PD-Methode von M1β – M5β.

Insgesamt hat sich aber die Aussagekraft der Mittelwerte über die Peak-Differenzen, im Vergleich zum Originalsignal (siehe Abb. A.8), erhöht.

5.2.2 Auswertung der PD-Methode

Im letzten Schritt wird die PD-Methode auf M11 bzw. die Kurvenmessung angewandt. Für die Methode wird ein Intervall von 1 Sekunde gewählt. Wenn die Abtastzeit 10 ms beträgt, werden demnach 100 Differenzwerte in einen Vektor geschrieben. Von dem Vektor wird der Median genommen, der starke Abweichungen unterdrückt und das Signal glättet. Nachdem erstellen des Vektors wird dieser mit einem gleitenden Mittelwertfilter der Ordnung 15 gefiltert. Der Schritt wurde zusätzlich unternommen um das Signal zu Glätten. Wenn das Intervall größer eingestellt wird, glättet sich die Kurve von selbst und die Höhe der Ordnung kann im nachgesetzten Mittelwertfilter runter gestellt werden. Im folgenden Plot wird die Kurvenmessung (siehe Abb. A.10) der Spule Alpha mit der PD-Methode ausgewertet.

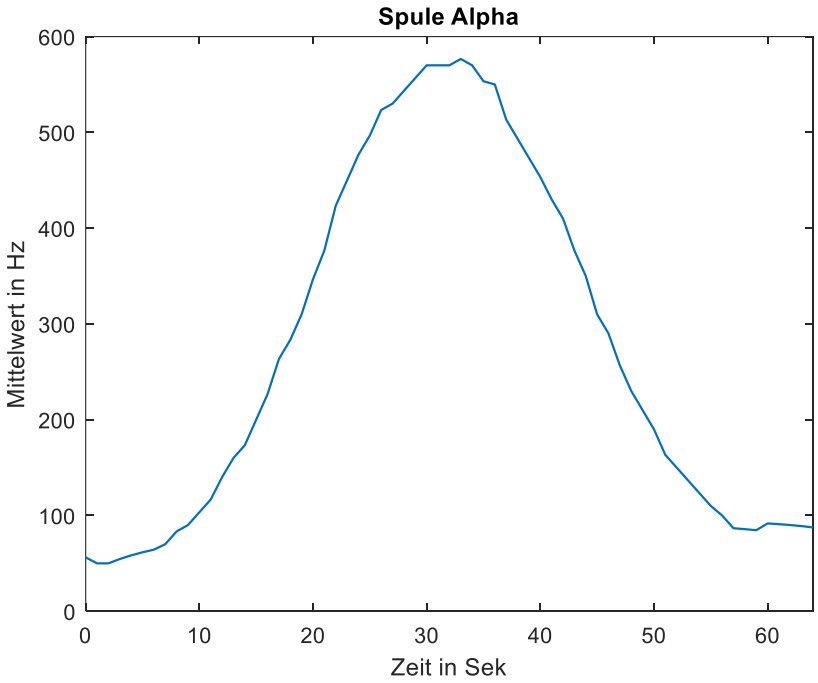

Abbildung 5.9: Verlauf von 65 Peak-Differenz Vektoren von M11α.

Wie das Ergebnis zeigt, entsteht eine Kurve die den Erwartungen entspricht. Zuerst wurde der Niederschlag auf 10 ml eingestellt. Dann kontinuierlich auf 130,5 ml hochgedreht und danach wieder auf 10 ml runtergedreht. Aufgrund des Filters ist die Kurve extrem geglättet. Wenn der Filter nicht vorhanden ist, hat die Kurve Einbrüche um 100 Hz. Daran erkennt man, dass in den ersten und letzten 10 Sekunden keine Steigung stattfindet (siehe Abb. A.12). Scheinbar wird der niedrige Niederschlagsbereich nicht eindeutig erkannt. Ein Plot, der nur die Peak-Differenzen angibt, findet sich in Abb. A.13. An diesem kann das gleiche Verhalten beobachtet werden. Außerdem wird der Zuwachs an höher werdenden Peaks verdeutlicht (siehe Abb. A.13, Zeit zwischen 10 und 55 Sekunden). Bei der Spule Beta hingegen entsteht kein vergleichbares Ergebnis. Es entwickelt sich mit der gleichen

Konfiguration des Algorithmus ein abfallendes Verhalten, je höher der Niederschlag wird (siehe Abb. 5.10 und Abb. A.14).

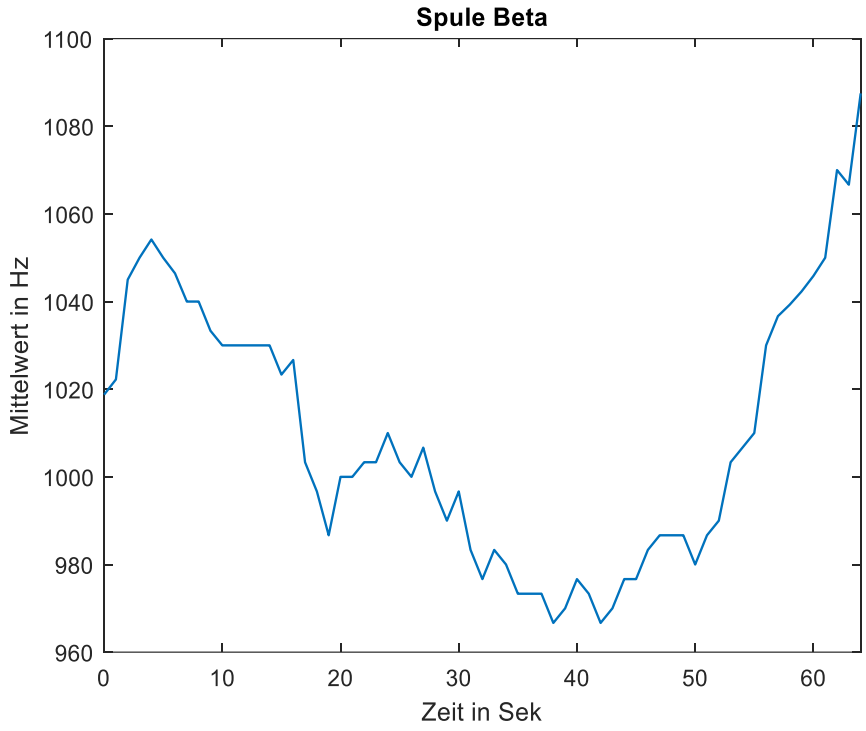

Abbildung 5.10: Verlauf von 65 mediangefilterten Peak-Differenz Vektoren von M11β.

Wenn hingegen der Verlauf des Niederschlages in Abb. A.11 analysiert wird erkennt man ab 10 Sekunden bis ungefähr 60 Sekunden einen Anstieg. Danach fallen die Werte stark ab, bis sie ab 95 Sekunden wiederrum ansteigen. Das Verhalten könnte den Verlauf des Niederschlages darstellen. Der starke Abfall ist sehr wahrscheinlich auf ein überschwappen des Wassers zurückzuführen.

5.3 Spektralanalyse

Wie bereits im Kapitel 3.3 geschrieben wird aufgrund der Stochastik das Leistungsdichtespektrum geschätzt. Die Idee ist es, mit der Hilfe des Periodogrammes, frequente Anteile aus dem Signal sichtbar zu machen. Wenn die Ausreißer aus dem Box-Plot einer Regelmäßigkeit folgen, ist die Theorie dies im Betrags- bzw. Amplitudenspektrum darzustellen. Um erste Informationen zu sammeln, wird für jede Messung ein Periodogramm erstellt und ausgewertet. Frequenzspektren für die Spule Alpha (siehe Abb. A.15) und für die Spule Beta (siehe Abb. A.16). Für die Berechnung wurde vorher der lineare Trend der Signale abgezogen. Dadurch lässt sich jedoch der Offset bzw. der Gleichanteil des Signales bei 0 Hz nicht ablesen. Aufgrund des Leck-Effektes wird mit einer Länge von $N = 2^{13}$ gerechnet. Somit bildet sich ein Vielfaches der Periode. Zudem benötigt die FFT eine 2er-Potenz. Für weitere Informationen wird der Bachelorarbeit der Ordner „BA_Boedder“ mit den entsprechenden Figures aus Matlab zur Verfügung gestellt.

In dem LDS zur Spule Alpha wird die Amplitude und nicht die Leistung abgebildet. Das hat den Vorteil, dass der erste Peak verhältnismäßig klein gegenüber den anderen dimensioniert wird. Dadurch lassen sich die nachfolgenden deutlicher erkennen. Beim Auswerten fällt der erste Peak bei 0,01221 Hz auf. Mit der Formel 3.7 lässt sich die Frequenz erklären.

$$f_0 = \frac{f_a}{N} = \frac{100\,Hz}{2^{13}} = 0{,}01221\,Hz \text{ oder } f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{N*t_a} = \frac{1}{2^{13}*0{,}01\,s} = 0{,}01221\,Hz$$

Die Frequenz gibt die Schrittweite des Linienabstandes im Spektralbereich und die Grundfrequenz des Signales an. Es wird angenommen, dass die Amplitude an dieser Stelle durch die geringe Signalschwankung, sowie von einem Teil des Offsets stammt. Wenn nicht der Lineare Trend, sondern die Polynomfunktion des Signales abgezogen wird, verkleinert sich die Amplitude. Es gilt, je höher die Ordnung des Polynoms, umso kleiner wird der Peak.

Im Wesentlichen beginnen die darauffolgenden Peaks der Spule Alpha bei 4 Hz. Von M1α bis M6α liegen um 4 Hz herum weitere Peaks, die von der Amplitude größer oder kleiner sind. Ab M6α sind die Peaks um 4 Hz nicht mehr enthalten. Die darauffolgenden Peaks sind Vielfache von 4 Hz, die in jeder Messung mit unterschiedlichen Amplituden auftauchen. Auffällig sind die fehlenden Peaks bei 36 Hz, der nur bei M7α geblieben ist. Des Weiteren fehlt in M8α der 48 Hz Peak und in M1α die Peaks bei 44 Hz und 48 Hz. Eine weitere Auffälligkeit ist die Amplitude bei 12 Hz, die in jeder Messung (in der Kategorie Vielfache von 4 Hz) den größten Wert annimmt.

Bei der Spule Beta wird zusätzlich zur Amplitudendarstellung die logarithmische Darstellung in dB angegeben. Der Grund sind die großen Amplituden der Grundfrequenz, die wegen der Skalierung, die Suche nach den anderen Amplituden erschweren. Alle Messungen haben wieder den Peak bei der Grundfrequenz. Die Amplitude ist allerdings deutlich größer. Dies lässt sich auf eine größere Bandbreite der Frequenzwerte zurückschließen. Von M1α zu M2β beträgt die Differenz des Grundfrequenzpeaks 53.006 Hz. Das ergibt einen Zuwachs von über 99 %. Zu M1β kann eine signifikante Amplitude bei 4,236 Hz und zu M2β eine bei 3,394 Hz, sowie bei 25,04 Hz festgestellt werden. In M3β bis M5β sind Vielfache Frequenzen von 4 Hz enthalten. Der Peak bei 4 Hz fehlt jedoch in jeder Messung der Beta-Reihe. Die Peaks sind um 4 Hz herum angeordnet. Zudem werden Peaks angezeigt die kein Vielfaches von 4 Hz sind.

Für eine weitere Analyse, wird an dieser Stelle ein zwischen Fazit gezogen. Ein Merkmal das hervorsticht, ist die Regelmäßigkeit der Peaks, die alle Vielfache von 4 Hz vorkommen. Im Vergleich der Spule Alpha und Beta, lassen sich in Alpha, über signifikante Peak-Ausschläge, eine größere Anzahl an frequenten Anteilen feststellen. In M7α sind dabei alle Vielfachen von 4 Hz enthalten. Aufgrund dieser Tatsache wird die M7α Messung benutzt, um die Regelmäßigkeit der Peaks bei 4 Hz zu erläutern. In dem Zusammenhang stellt sich vorerst die Frage - Warum liegt der Peak bei 4 Hz?

Mithilfe eines generierten Datensatzes wird eine Theorie aufgestellt, die die Fragestellung anschaulich beantworten soll. Dazu wurde ein Sinus-Signal mit einer Frequenz von 3 Hz und der Amplitude von 0,5 erstellt. Das Signal wird zudem mit normalverteiltem Rauschen überlagert. Im Folgenden wird angenommen, dass die Ausreißer im Signal einen bestimmten Abstand befolgen. Aus diesem Grund wurden dem Signal zum Anfang und in der Mitte Peaks hinzugefügt, die alle 13 Abtastwerte auftauchen. Die Amplituden sind für den Versuch gleich groß eingestellt. Die Abtastzeit t_a beträgt 10 ms.

Aufgrund der Tatsache, dass im Periodogramm die Fourier-Transformierte über die AKF des Signals genommen wird, werden im zweiten Subplot die Autokorrelationen dargestellt. Zum Vergleich wird eine AKF mit einem Blackman-Fenster (Abb. 5.11 (b), blau) und die andere ohne Fenster (Abb. 5.11 (b), orange) abgebildet. Die Varianz wird infolge der Verschiebung des Signals zum Ende größer, da weniger Daten verglichen werden. Durch die Gewichtung wird zum einen die Varianz am Ende des Signals unterdrückt und zum anderen der Leck-Effekt verringert. In (Abb. 5.11, (c)) wird das Ergebnis der Fourier-Transformation angegeben. Aus dem Plot wird zum einen die Regelmäßigkeit der Peaks und zum anderen der Grund ersichtlich, warum der erste signifikante Peak bei 7,617 Hz liegt.

(a)

(b)

(c)

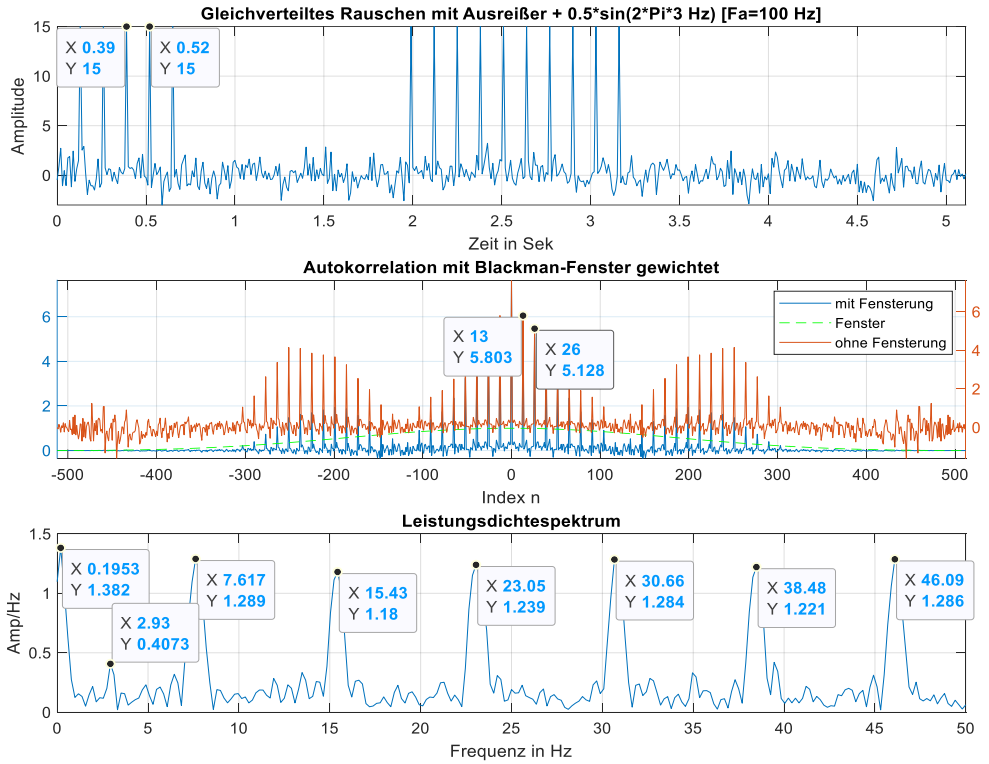

Abbildung 5.11: Überlagertes Sinussignal, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum. (a) Überlagertes Sinussignal mit Weißem-Rauschen und Ausreißer, (b) AKF des Signalgemisches mit und ohne Blackman-Fenster, (c) LDS der AKF.

Mit folgender Rechnung zeigt sich der Zusammenhang der Ausreißer mit den Peaks im Periodogramm.

$$f_p = \frac{1}{13 * t_a} = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{13 * 10\,ms} * 1000 = 7{,}692\,Hz \tag{5.1}$$

Aufgrund der Periode T_p der Ausreißer entstehen im Spektrum die Peaks. Da sich das Signal während der Berechnung periodisch wiederholt (siehe 3.3.3) entstehen Vielfache von f_p. Die Amplituden der Vielfachen sind ungefähr gleich groß, da auch die Ausreißer im Signal die gleiche Amplitude aufweisen. Angesichts der Steigung der Ausreißer, benötigt die Fourier-Reihe hohe frequente Anteile mit einer entsprechenden Leistungsdichte, um diese darzustellen (siehe Abb. A.18). Zur Vollständigkeit werden die ersten beiden Peaks ebenfalls erklärt. Der erste Peak bei 0,1953 Hz gibt wieder die Grundfrequenz des Signals an. Der zweite Peak liegt bei 2,93 Hz und hat eine Amplitude von 0,4838. Er gibt die Frequenz und Amplitude des Sinus-Signals an. Ist aber wegen des Rauschens und der Fensterung vom Soll-Wert abgewichen.

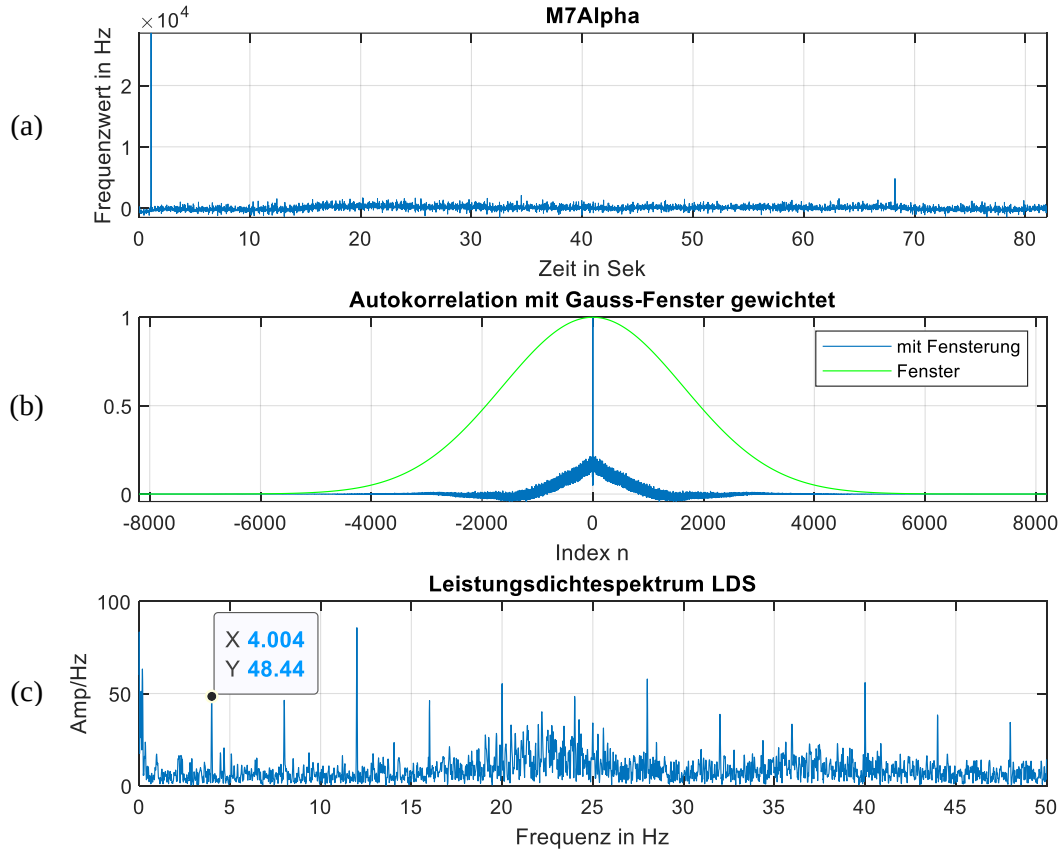

Abbildung 5.12: M7α, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum. (a) Signal von M7α, (b) AKF von M7α mit Gauss-Fenster, (c) LDS der AKF.

Die Theorie wird an M7α angewandt und gibt das zu erwartende Ergebnis. Mit einer Abtastzeit von 10 ms und einer Wiederholung der Ausreißer von 25 Abtastwerten entsteht die Periodendauer $T_p = 250\,ms$. Daraus ergibt sich mit der Formel 5.1 die Frequenz f_p von 4 Hz. Hinsichtlich der Periodizität der Ausreißer kann angenommen werden, dass diese Hardware und/oder Software seitig stammen. Die Theorie wird dadurch unterstützt, dass die Mikrocontroller nicht neu gestartet wurden

und somit immer das gleiche Verhalten aufweisen. In der Bachelorarbeit von M. Batalla wird gezeigt, dass die Ausreißer durch das Senden entstehen. Beim Sendeverfahren fängt die Zeit des ESP-Timer an zu schwanken. Aufgrund dessen zählt der PCNT die Flanken nicht richtig. Die Folge sind Ausreißer, welche im Frequenzspektrum sichtbar werden. Das in einigen Messungen, vor allem bei der Spule Beta nicht alle Vielfachen Frequenzen im Spektrum erkennbar sind und weitere frequente Anteile entstehen, kann folgenden Grund haben. Die Ausreißer werden möglicherweise von dem sensiblen Rauschverhalten der Spule überlagert. In der FFT können diese nicht mehr eindeutig detektiert werden. Abbildung 5.13 soll die Theorie verdeutlichen. Die Ausreißer haben eine Amplitude von 2, anstatt von 15.

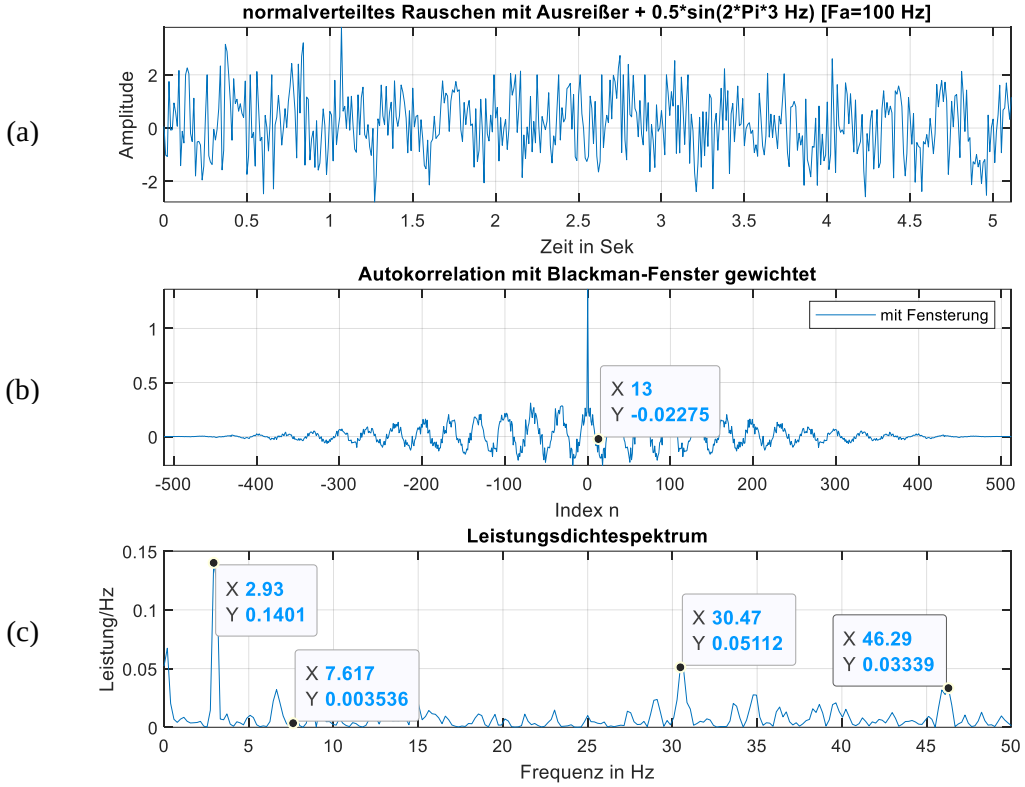

Abbildung 5.13: Überlagertes Sinussignal, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum. (a) Überlagertes Sinussignal mit Weißem-Rauschen und Ausreißer mit einer Amplitude von 2, (b) AKF des Signalgemisches mit Blackman-Fenster, (c) LDS der AKF.

Die AKF erkennt die Amplituden mit der Periodendauer von 130 ms nicht mehr eindeutig. Die Funktion wird schmaler, was auf einen schwachen inneren Zusammenhang zurückzuführen ist. In Abbildung 5.13 (c) erkennt man, dass der Leistungsanteil der Vielfachen Frequenzen zum Teil verschwindet oder von anderen frequenten Anteilen unterdrückt wird.

6. Zusammenfassung

Verhaltensmuster und Auswirkung auf das System

Insgesamt sind drei entscheidende Merkmale aufgefallen, die das Auswerten der Daten erschweren. Der erste Punkt ist das **Rauschen**, welcher im Großteil durch das nicht saubere Auswerten des PCNT verursacht wird. Der restliche Teil kommt von äußeren Einflüssen, die je nach Spulenkonfiguration stärker oder schwächer aufgenommen werden. Das zweite Merkmal bezieht sich auf die **Ausreißer**. Diese wurden durch das Frequenzspektrum sichtbar gemacht und entstehen im Wesentlichen wegen des Sendeverfahrens. Der letzte Punkt sind die **Frequenzschwankungen** im Signal. In diesem Fall wird zwischen lang- und kurzzeitigen Schwankungen unterschieden. Langzeitige entstehen aufgrund der Umgebungstemperatur. Kurzzeitige sind durch Erschütterungen, kapazitive Einflüsse und Wasser Zu- und Abfluss zu erklären.

Frage 1: Liefert das System eine ausreichende Antwort auf den Niederschlag?

Nach den Erwartungen 1.a bis 1.c zu urteilen hat das System in dieser Konfiguration Schwierigkeiten. Dennoch zeigen einzelne Datensätze die richtige Tendenz. Wenn die Systemkonfiguration angepasst wird, sollten die Erwartungen erfüllt werden und somit eine ausreichende Antwort auf den Niederschlag bilden.

Frage 2: Kann über die Resonanzfrequenz der Niederschlag zugeordnet werden?

Bei der Spule Alpha kann der Niederschlag nicht direkt zugeordnet werden. Wenn hingegen die PD-Methode genutzt wird, entsteht eine Kurve in Glockenform. An diesem Verlauf kann der Niederschlag theoretisch zugeordnet werden. Dazu muss die Funktion der Kurve eindeutig definiert sein. Die Spule Beta dagegen ist nicht für die PD-Methode geeignet. Sie könnte den Niederschlag direkt über die Resonanzfrequenz zuordnen. Dazu müssten die Punkte 1.a bis 1.c eindeutig verbessert werden.

Frage 3: Welche Spule ist besser zur Auswertung des Niederschlages geeignet?

Die Resonanzfrequenz der Spule Alpha liegt im Mittel bei ungefähr 1,7 MHz und ist deutlich geringer als die der Spule Beta (8 MHz). Infolgedessen sind alle Kennwerte der Spule geringer. Sie hat eine geringere Streuung, weniger Rauschen und weniger Ausreißer (siehe Tabelle 5.1). Daraus lässt sich schließen, dass sie robuster gegenüber äußeren Einflüssen, wie kapazitiven Anteilen, ist. Bei kleinen Niederschlagsmengen ist sie allerdings nicht sensibel genug. Das zeigen die ersten und letzten 10 Sekunden der Kurvenmessung und die niedrige IQR von M5α bis M10α. Große Niederschlagsmengen kann die Spule über die Ausschläge der Tropfen besser erkennen (siehe Abb. A.13).

Auf die Niederschlagsmenge und das resultierende Gewicht auf der Membran, hat sie schwächer reagiert. Die Spule Beta hat eine höhere Resonanzfrequenz und ist empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen (siehe Abb. 5.6). Insgesamt ist sie sensibler und reagiert stärker auf das Wasser der Membran. Das ist der Grund, warum die direkte Methode der Auswertung besser anschlägt. Durch die äußeren Einflüsse und dem stärkeren Rauschverhalten erkennt sie die Tropfeneinschläge wiederum nicht mehr (siehe Abb. A.14). Somit erzeugt die PD-Methode keine erfolgreichen Ergebnisse an der Spule Beta.

7. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Messeinrichtung in der Lage ist, die Niederschlagsintensität und Tropfengröße zu bestimmen. Dazu müssen jedoch einige Änderungen vorgenommen werden. Um Tropfen erfolgreich während des Regens zu erkennen, müssen die Ausreißer entfernt und die Rauschamplituden verringert werden. Insgesamt muss das System robust gegenüber äußeren Einflüssen sein, aber sensibel genug, um leichte Niederschlagsmengen zu erkennen. An diesem Punkt knüpft die Bachelorarbeit von M. Batalla an. In der Arbeit wird unter anderem auf die Systemkonfiguration eingegangen, um das zuvor genannte Ziel zu erreichen. In dieser Hinsicht wird die Wahl der Spule und des Kondensators, sowie der Abstand zur Membran behandelt. Zudem wird ein erfolgreicher Abschluss der Ausreißer-Problematik gefunden.

Für die Zuordnung der Resonanzfrequenz einer Niederschlagsmenge muss ein Algorithmus geschrieben und im Mikrocontroller implementiert werden. Entweder wird dazu die PD- oder die direkte Methode verwendet. Der erhebliche Vorteil der PD liegt darin, dass Schwankungen der Resonanzfrequenz keine Auswirkung auf die PD-Methode nehmen. Es wird nur auf die Änderung von aufeinander folgenden Peaks eingegangen. Wenn keine Ausreißer vorhanden sind und das Rauschen niedrig ist, sollte die Methode geeignet sein, um den Niederschlag zu bestimmen. Um das festzustellen müssten erneute Messungen mit verschiedenen Niederschlägen durchgeführt werden. Mit der direkten Methode würde man den Niederschlag über den Verlauf der Resonanzfrequenz ermitteln. Dazu könnten Hochpassfilter eingesetzt werden, die den Einfluss von ungewollten Signalschwankungen filtern. Langzeitdrifte können unterdessen mit einer internen Temperaturmessung rausgerechnet werden. Eine weitere Vorgehensweise wäre die Untersuchung des Masse-Feder-Dämpfer Systems. Dafür müsste die Systemantwort eines Impulses ausgewertet werden. Parameter wie das Dämpfungsverhalten, die Kreisfrequenz und der Verstärkungsfaktor könnten daraus berechnet werden.

Des Weiteren wird in Zukunft ein Rain[e] Niederschlagssensor als Vergleichsmessung herangezogen. Mit dem Sensor stehen einem hochauflösende Niederschlagsdaten zur Verfügung. Die ermittelten Daten aus dem Sensor müssten dementsprechend aufgearbeitet und mit den Daten des induktiven Niederschlagssensors verglichen werden.

Literaturverzeichnis

[1] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Projektumriss KIWaSuS,“ April 2021. [Online]. Available: https://www.sifo.de/sifo/shareddocs/Downloads/files/projektumriss_kiwasus.pdf. [Zugriff am 23 03 2022].

[2] Deutscher Wetterdienst, „Starkregen,“ [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572. [Zugriff am 26 03 2022].

[3] Hochschule Ruhr West, „KIWaSuS – KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten,“ 2022. [Online]. Available: https://kiwasus.de/. [Zugriff am 26 03 2022].

[4] Hochschule Ruhr West, „KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten,“ 04 05 2021. [Online]. Available: https://www.hochschule-ruhr-west.de/kiwasus/. [Zugriff am 23 03 2022].

[5] LAMBRECHT meteo GmbH, „rain[e] Wiegender Niederschlagssensor,“ [Online]. Available: https://www.lambrecht.net/produkte/niederschlag/wiegender-niederschlagssensor-rain-e. [Zugriff am 02 04 2022].

[6] Hochschule Ruhr West, „AP 2: Entwicklung eines LowCost-Sensorsystems zur Messung von Niederschlag und Abfluss im Kanalnetz,“ 2022, [Online]. Available: https://kiwasus.de/arbeitspakete/entwicklung-eines-lowcost-sensorsystems-zur-messung-von-niederschlag-und-abfluss-im-kanalnetz/. [Zugriff am 26 03 2022].

[7] M. Batalla, „Praxissemesterbericht - Entwicklung eines induktiven LowCost-Sensorsystems zur Messung von Niederschlägen,“ Mülheim an der Ruhr, 2021.

[8] The MathWorks, Inc., „MATLAB,“ [Online]. Available: https://de.mathworks.com/products/matlab.html. [Zugriff am 23 03 2022].

[9] H.-R. Tränkler und L. M. Reindl, Sensortechnik Handbuch für Wissenschaft und Technik, Bd. 2, Freiburg: SpringerVieweg, 2014.

[10] H.-R. Tränkler, Taschenbuch der Messtechnik, Bd. 4, München Wien: R.Oldenburg, 1996.

[11] Heltec Automation, „WiFi LoRa 32 (V2),“ [Online]. Available: https://heltec.org/project/wifi-lora-32/. [Zugriff am 15 03 2022].

[12] LoRa Alliance, „What is LoRaWAN® Specification,“ [Online]. Available: https://lora-alliance.org/about-lorawan/. [Zugriff am 15 03 2022].

[13] J. d. C. Silva, J. J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic und A. L. L. Aquino, „LoRaWAN - A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities,“ IEEE, Brazil, Portugal, Croatia.

[14] ESPRESSIF SYSTEMS, „ESP-NOW,“ [Online]. Available: https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview. [Zugriff am 15 03 2022].

[15] ESPRESSIF SYSTEMS, „ESP-NOW User Guide,“ 2016. [Online]. Available: file:///C:/Users/Alexander%20B%C3%B6dder/Downloads/esp-now_user_guide_en.pdf. [Zugriff am 15 03 2022].

[16] R. Viana und J. G. A. Murta, „ESP32 – Frequencímetro de precisão,“ 2021. [Online]. Available: https://blog.eletrogate.com/esp32-frequencimetro-de-precisao/. [Zugriff am 15 03 2022].

[17] Espressif Systems, „Pulse Counter,“ [Online]. Available: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2/esp32/api-reference/peripherals/pcnt.html. [Zugriff am 15 03 2022].

[18] Studyflix GmbH, „Boxplot,“ [Online]. Available: https://studyflix.de/statistik/boxplot-1044. [Zugriff am 28 03 2022].

[19] O. Beucher, „LTI-Systeme und Stochastische Signale,“ in *Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2015, p. 142.

[20] R. Hoffmann und M. Wolff, Intelligente Signalverarbeitung 1, Bd. 2, Dresden und Cottbus: Springer Vieweg, 2014.

[21] B.-U. Köhler, Konzepter der statistischen Signalverarbeitung, Berlin: Springer Vieweg, 2005.

[22] M. Werner, Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB, Bd. 6, Fulda: Springer Vieweg, 2019.

[23] P. D.-I. J. Hoffmann, Spektrale Analyse mit MATLAB® und Simulink®, München : Oldenbourg Verlag , 2011.

[24] The MathWorks, Inc., „periodogram,“ [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/signal/ref/periodogram.html. [Zugriff am 30 03 2022].

[25] D. Massart, J. Smeyers-Verbeke, X. Caprona und K. Schlesierb, „Visual Presentation of Data by Means of Box Plots,“ 2005. [Online]. Available: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.169.9952&rep=rep1&type=pdf. [Zugriff am 30 03 2022].

[26] The MathWorks, Inc., „boxplot,“ [Online]. Available: https://de.mathworks.com/help/stats/boxplot.html. [Zugriff am 17 02 2022].

[27] P. D.-I. Lei, „Industrielle Signalverarbeitung Kap. 2: DFT, FFt und Goerzel-Algorithmus,“ Mülheim an der Ruhr.

[28] M. Batalla, „Bachelorarbeit - Optimierung der Hard- und Software eines induktiven Niederschlagssensors,“ Mülheim an der Ruhr, 2022.

[29] C. Clemens, P. D.-I. J. Himmel und P. D. K. Thelen, „Präsentation Regensensor,“ Mülheim an der Ruhr, 2020.

Anhang

Messung	Median	Differenz	IQR	Whisker-bereich	Ausreißer	extreme Ausreißer
	in Hz		Anzahl der Werte			
Spule Alpha						
1	1.715.500	0	4.700	12.600	0	0
2	1.724.500	27.800	1.500	5.900	9	2
3	1.725.400	6.700	1.000	4.000	61	5
4	1.725.200	27.500	1.100	4.300	28	6
5	1.726.200	22.200	600	2.400	75	9
6	1.726.300	21.000	400	1.600	275	36
7	1.726.300	28.200	400	1.600	394	44
8	1.724.200	28.100	700	2.700	193	16
9	1.724.500	28.500	600	2.400	116	19
10	1.724.600	47.400	800	3.200	73	14
Mittelwert	1.724.270	23.740	1.180	4.070	122	15
Std	2880,04	11738,84	1159,78	2963,12	115,71	13,18
Spule Beta						
1	7.799.800	228.900	14.500	57.900	2.023	114
2	8.104.450	297.350	75.250	266.900	383	205
3	8.001.800	136.700	4.300	17.100	190	23
4	8.003.500	131.300	17.700	58.500	15	11
5	7.982.500	87.000	4.400	17.600	22	9
Mittelwert	7.978.410	176.250	23.230	83.600	527	72
Std	90352,04	69507,19	24241,11	85310,84	693,96	70,17

Tabelle A.1: Daten aus den Box-Plot von Alpha und Beta Spule. Gezeigt wird der Median, die Differenz vom maximalen Ausreißer bis zum Median, der Interquartalsabstand, der Whiskerbereich, die Anzahl der Ausreißer und die Anzahl der Ausreißer welche als extrem definiert werden. Die unterschiedlichen Messungen werden im Mittelwert und der Standardabweichung (Std) zusammengefasst.

Messung	Mittelwert in Hz	Std in Hz	rel. Std in %
Spule Alpha			
1	1722000,65	2586,10	0,150
2	1724317,28	1067,35	0,062
3	1725315,98	745,22	0,043
4	1725212,46	841,54	0,049
5	1726243,09	508,11	0,029
6	1726325,88	430,29	0,025
7	1726309,85	500,24	0,029
8	1724330,63	712,84	0,041
9	1724477,48	582,95	0,034
10	1724824,80	814,59	0,047
Spule Beta			
1	7798804,89	19083,19	0,245
2	8100883,76	45657,73	0,564
3	8001951,89	3687,47	0,046
4	8009422,78	12166,32	0,152
5	7982679,70	3306,05	0,041

Tabelle A.2: Mittelwerte (in Hz) und Standardabweichungen (in Hz und Prozent) der Datensätze von den Alpha und Beta Spulen.

Messung	Median in Hz	Mittelwert in Hz
Spule Alpha		
1	100	120
2	0	144
3	0	112,4
4	200	233,8
5	0	122,8
6	0	135,8
7	0	131
8	0	178,2
9	100	158,6
10	0	118,4
Spule Beta		
1	1900	9840,8
2	1300	2057
3	4400	5182,6
4	500	1981,6
5	600	760

Tabelle A.3: Rauschverhalten der Alpha und Beta Spule, ausgedrückt mit dem Mittelwert und dem Median.

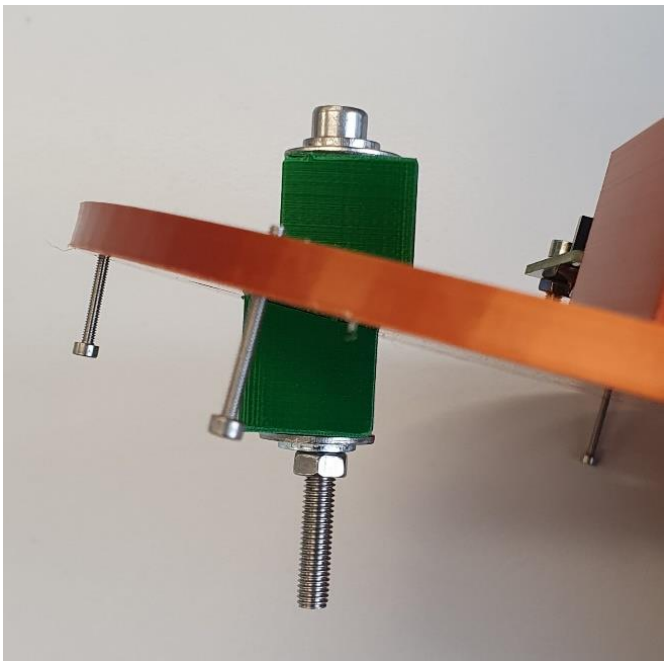

Abb. A.1: Abgesenkte Winkelstücke für die Schieflage des Sensors mit einem Winkel von 12°.

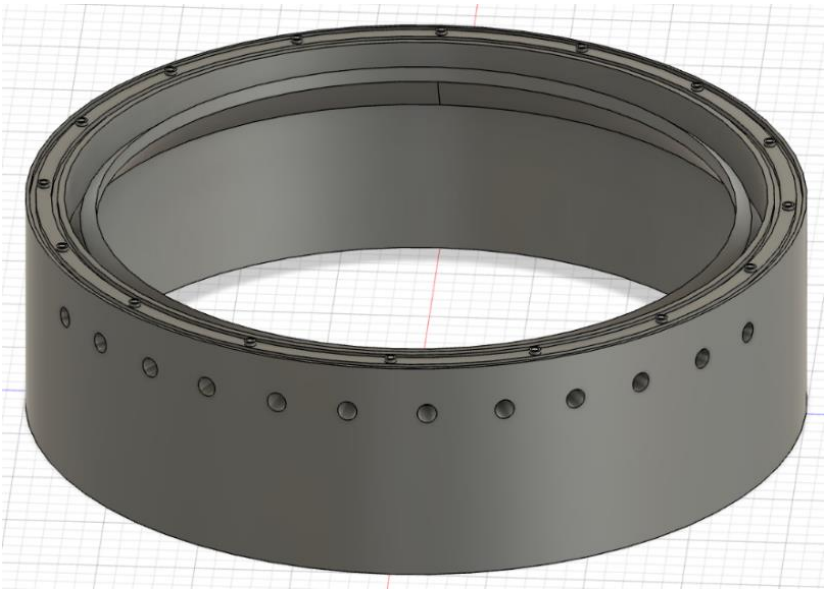

Abb. A.2: Außengehäuse des Sensors mit inneren Abflussring und Durchbohrungen, um mögliches Wasser abzuleiten.

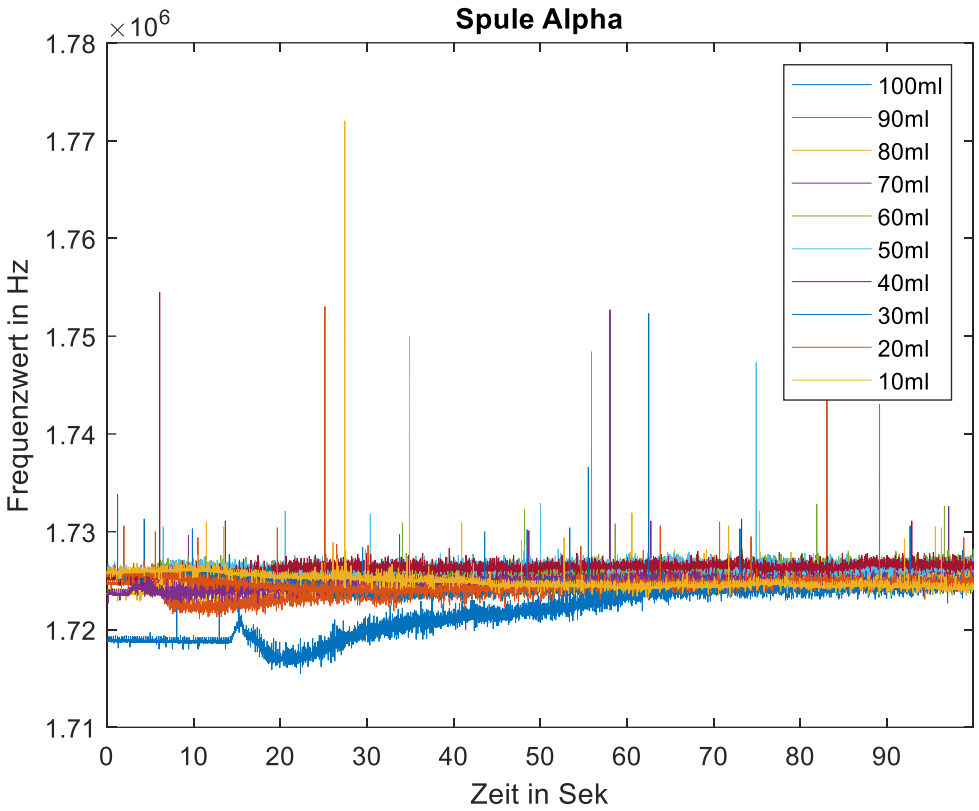

Abb. A.3: Signale Spule Alpha. Plot der Datensätze M1α-M10α in unterschiedlichen Farben.

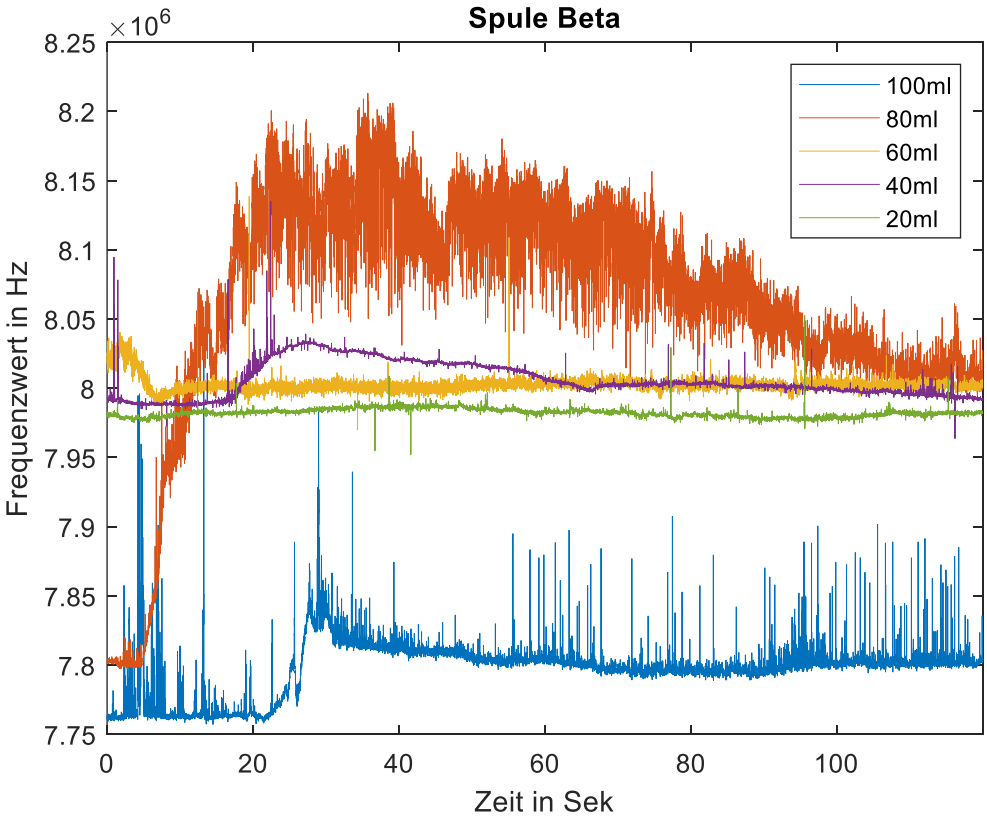

Abb. A.4: Signale Spule Beta. Plot der Datensätze M1β-M5β in unterschiedlichen Farben.

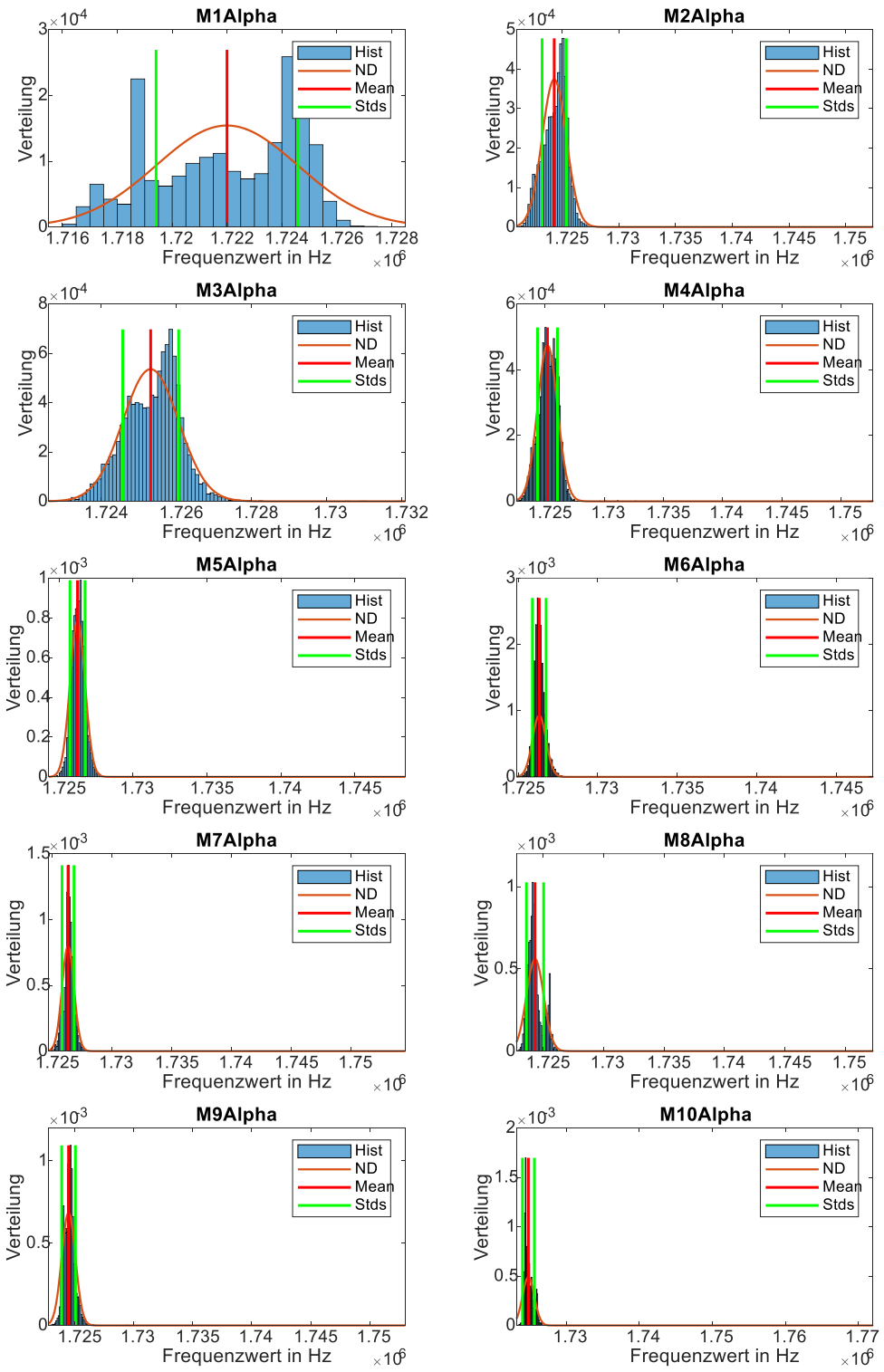

Abb. A.5: Histogramm, Normalverteilung, Mittelwert und Standardabweichung von M1α – M10α. Histogramm in blau (Hist), Normalverteilung in orange (ND), Mittelwert in rot (Mean), Standardabweichung in grün (Stds).

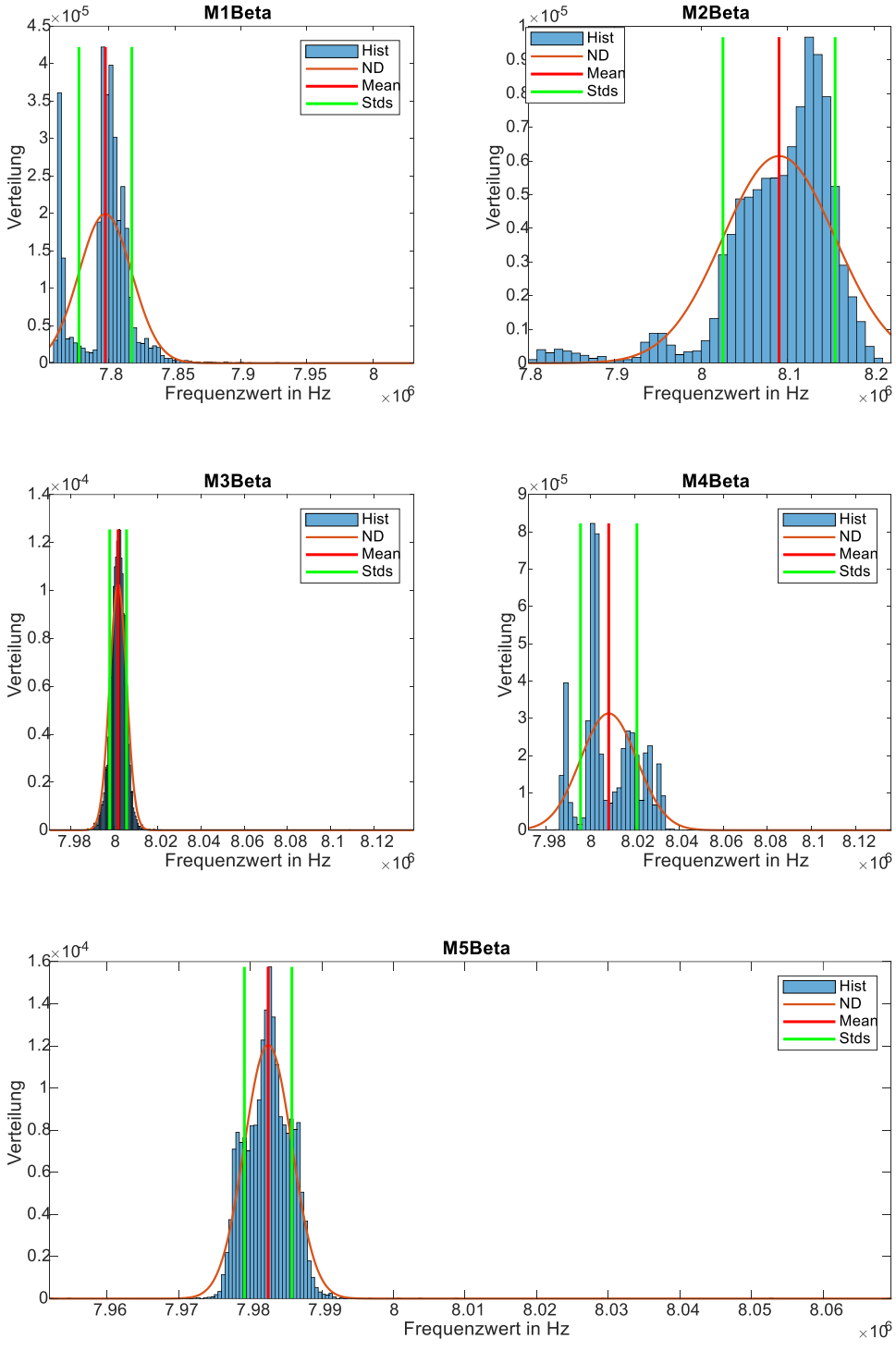

Abb. A.6: Histogramm, Normalverteilung, Mittelwert und Standardabweichung von M1β – M5β. Histogramm in blau (Hist), Normalverteilung in orange (ND), Mittelwert in rot (Mean), Standardabweichung in grün (Stds).

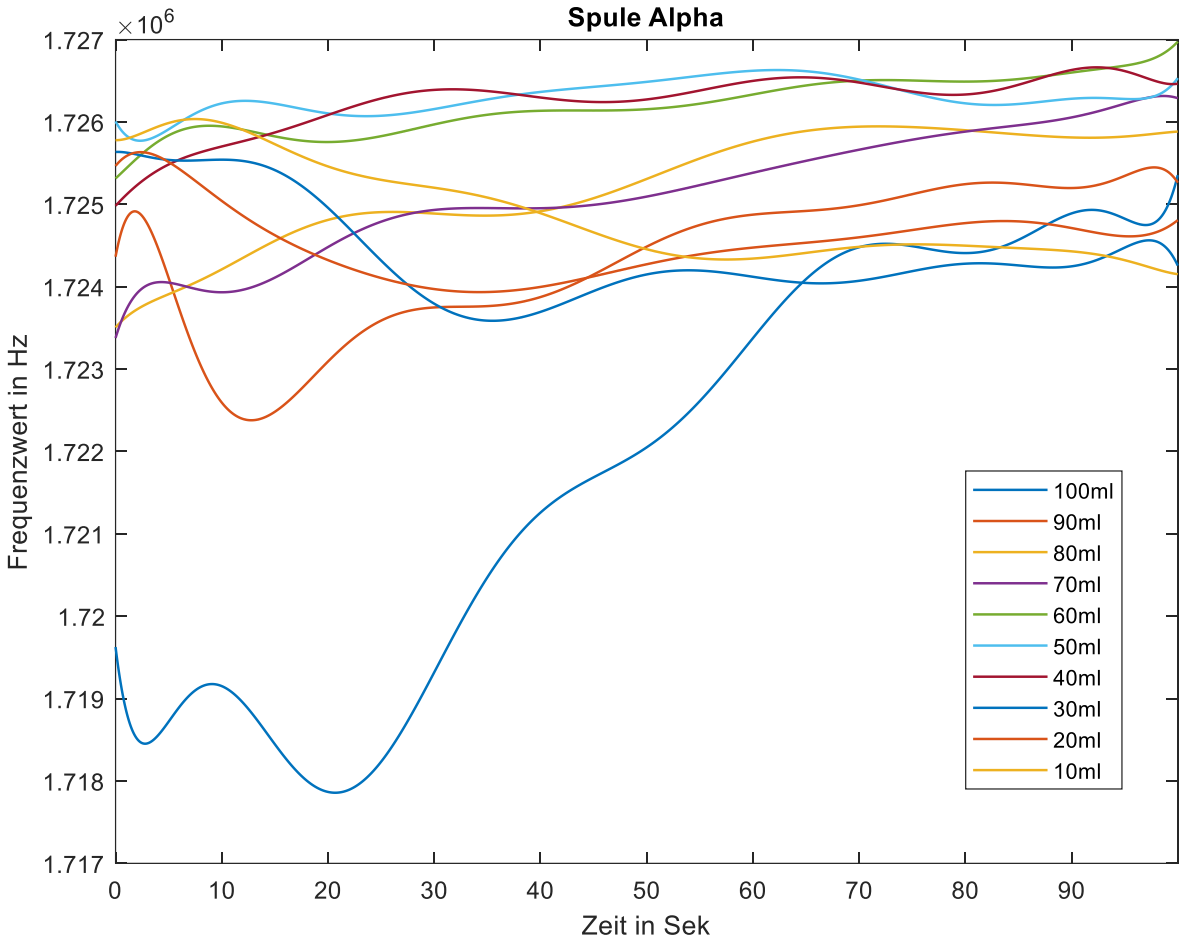

Abb. A.7: Polynomfunktion der Signale von Spule Alpha. Niederschlagsmengen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt.

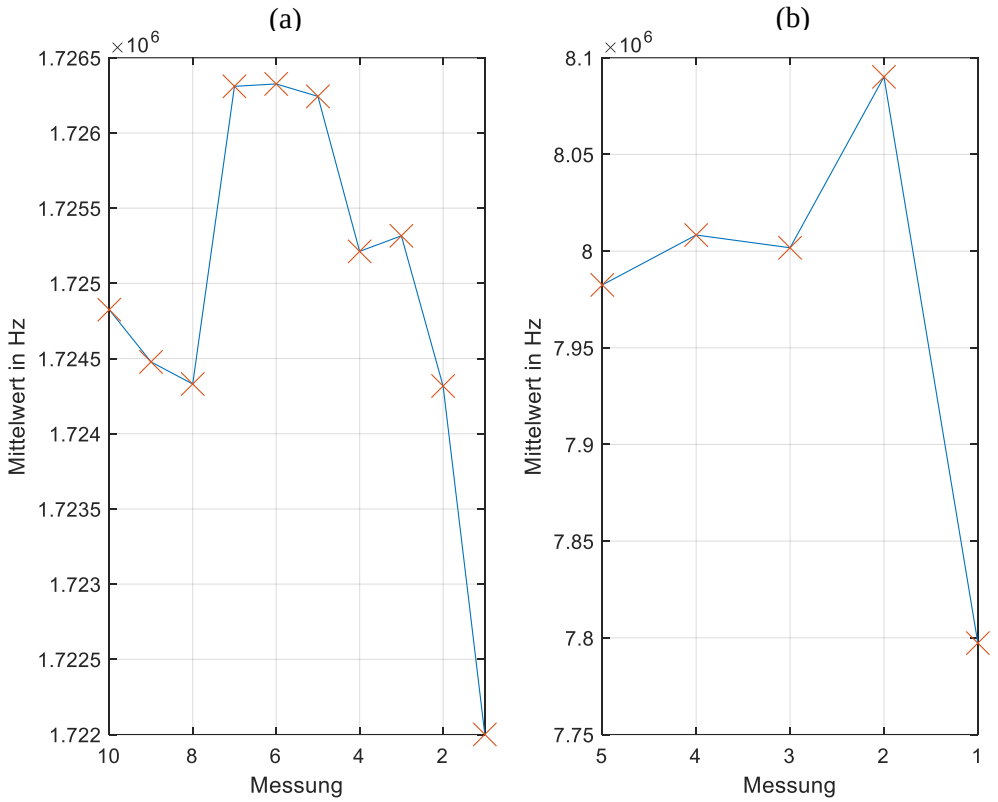

Abb. A.8: Verlauf der Mittelwerte in Hz (orangenes Kreuz) der Datensätze in abnehmender Reihenfolge. (a) M1α-M10α, (b) M1β-M5β.

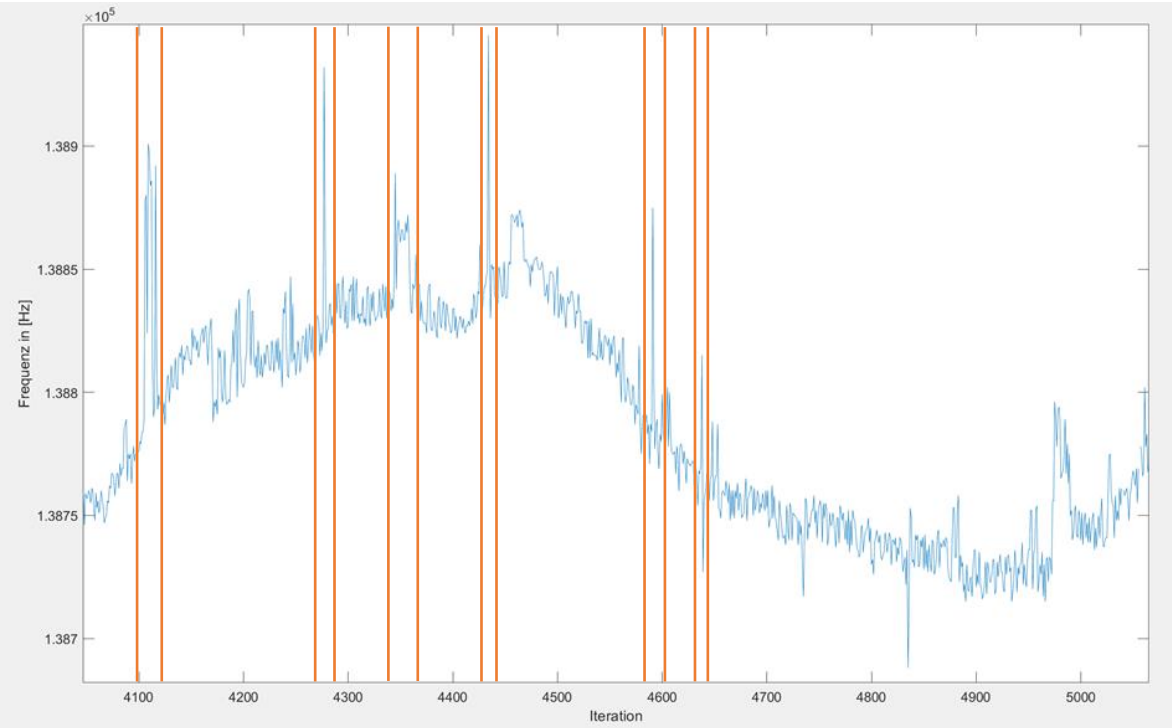

Abb. A.9: Verlauf der Frequenz in Hz von zufälligen Tropfeneinschlägen (orange markiert) auf der Membran. Abtastintervall 10 ms und 560 pF Kondensator.

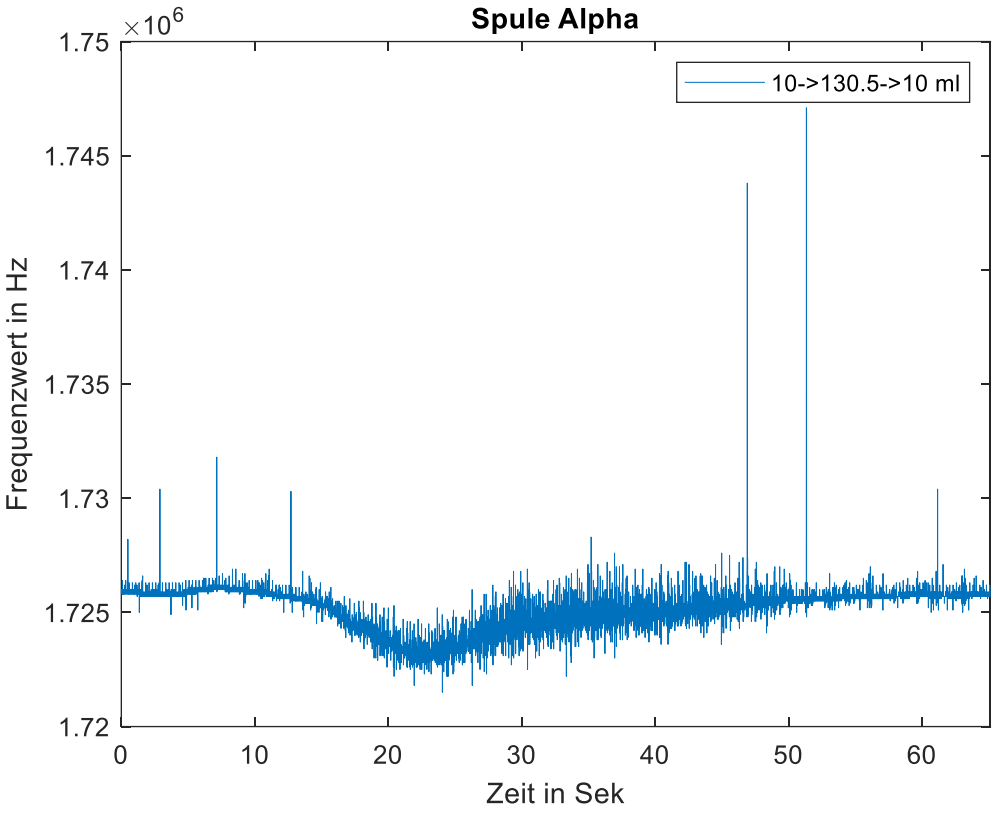

Abb. A.10: Verlauf der Frequenzwerte in Hz von M11α.

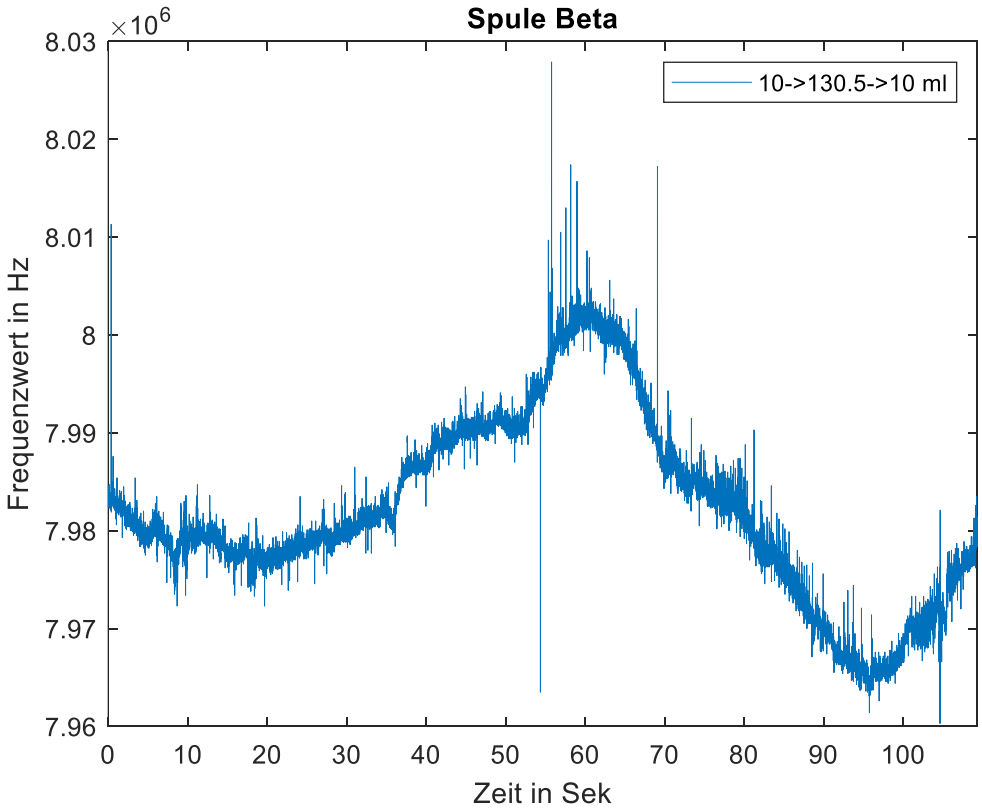

Abb. A.11: Verlauf der Frequenzwerte in Hz von M11β.

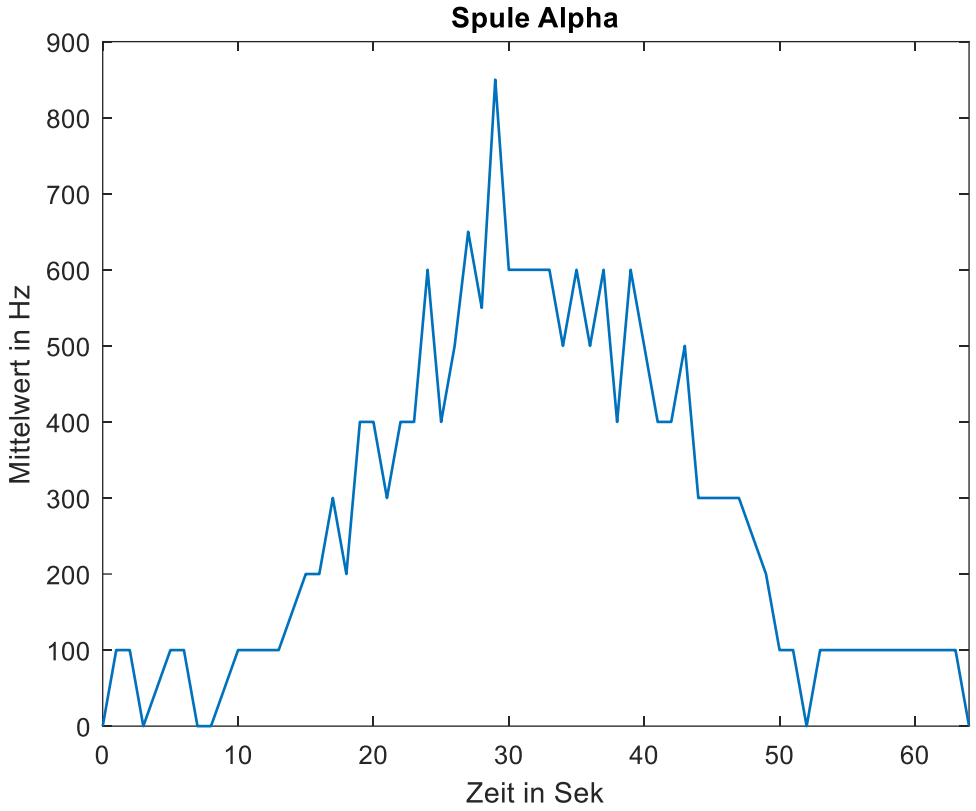

Abb. A.12: Verlauf von 65 Peak-Differenz Vektoren die nicht Mittelwertgefiltert sind von M11α.

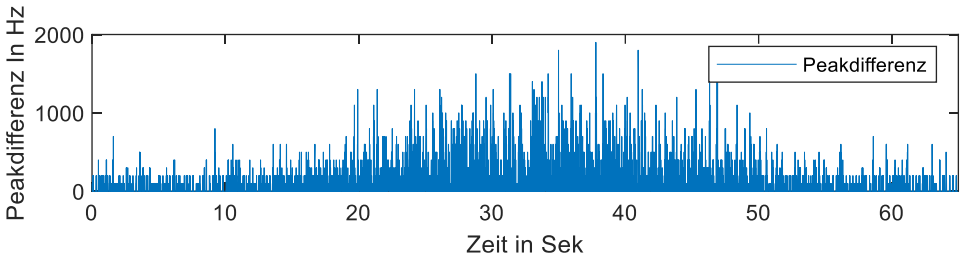

Abb. A.13: Verlauf der Peak-Differenzen von M11α.

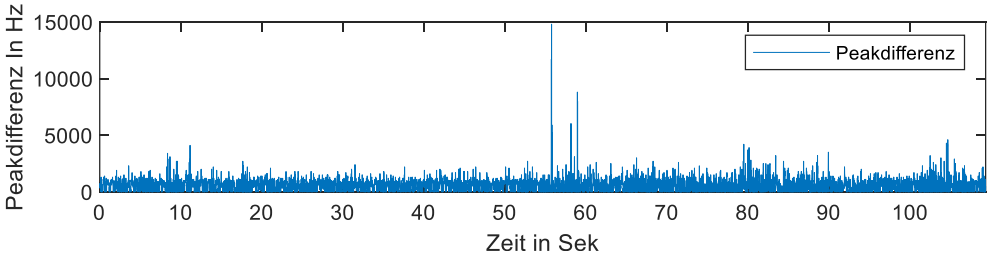

Abb. A.14: Verlauf der Peak-Differenzen von M11β.

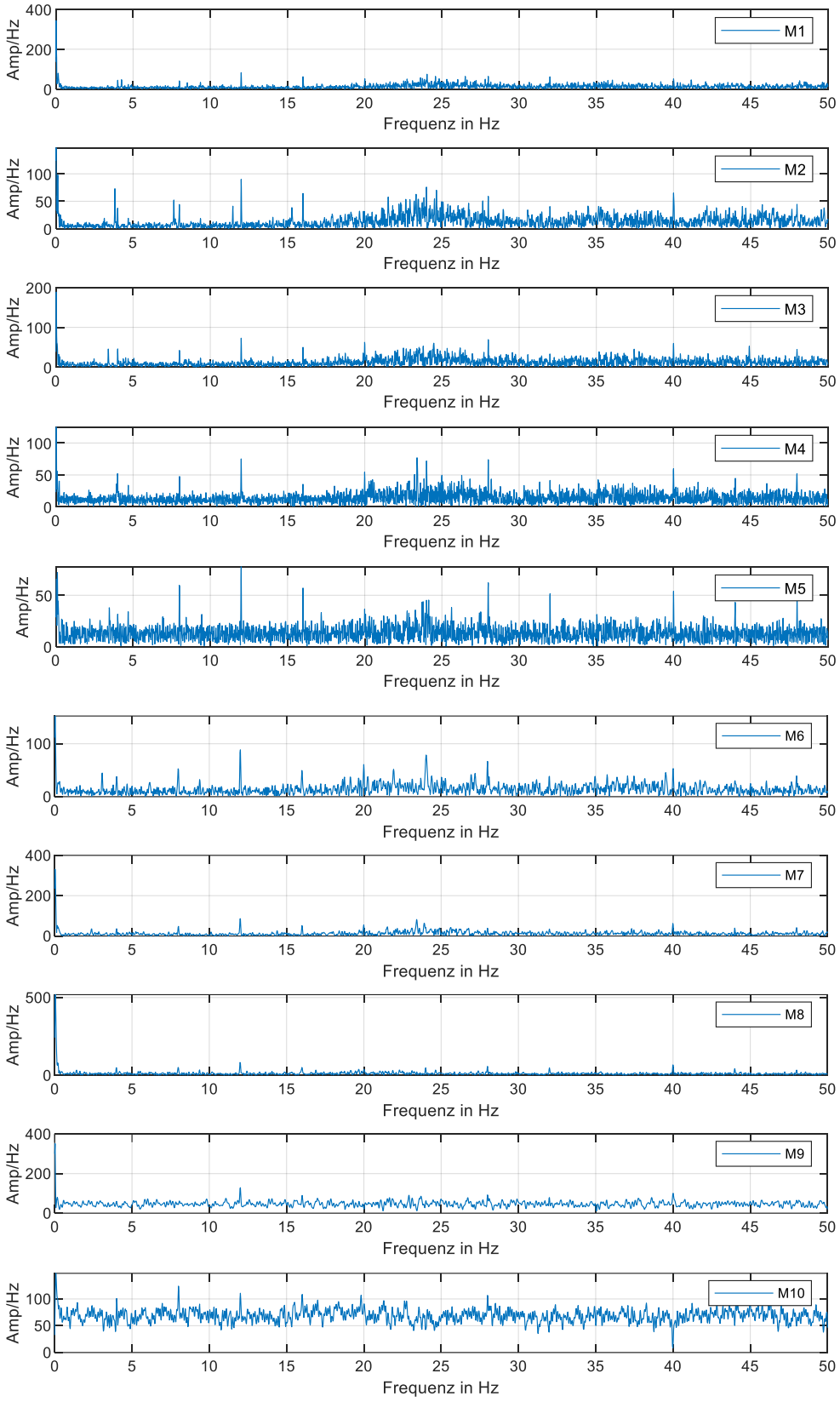

Abb. A.15: Frequenzspektren von M1α-M10α. Dargestellt sind die Amplitude und das halbe Frequenzspektrum bis 50 Hz.

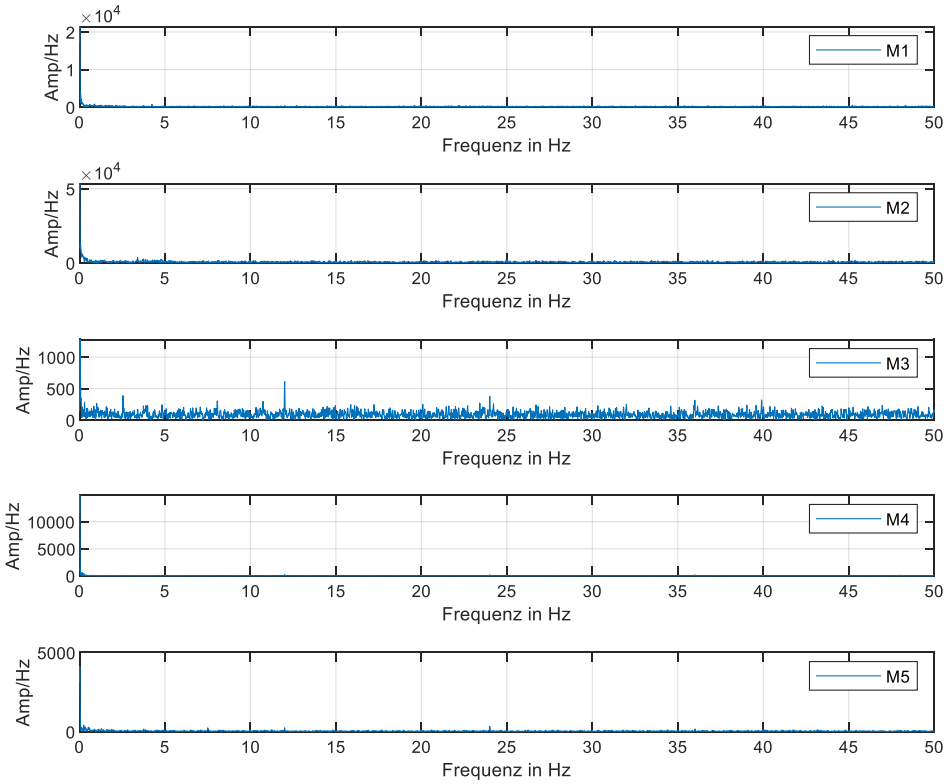

Abb. A.16: Frequenzspektren von M1β-M5β. Dargestellt sind die Amplitude und das halbe Frequenzspektrum bis 50 Hz.

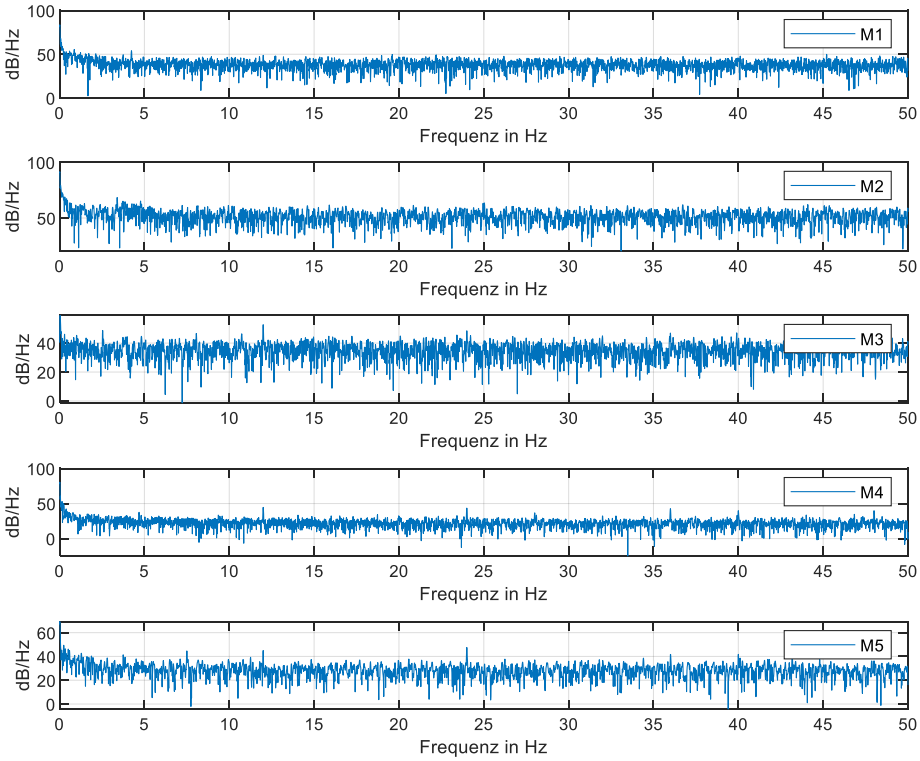

Abb. A.17: Frequenzspektren von M1β-M5β. Dargestellt sind der Logarithmus (in dB) und das halbe Frequenzspektrum bis 50 Hz.

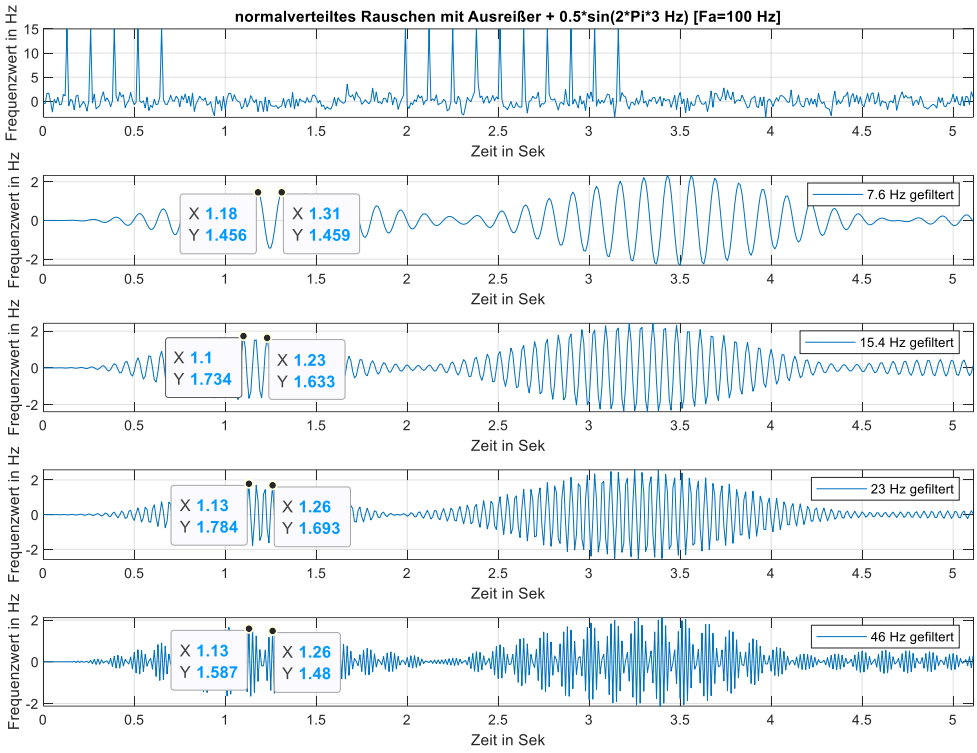

Abb. A.18: Bandpass gefilterte Signale des generierten Signales mit Ausreißer. Im Folgenden werden die Leistungsanteile der gefilterten Signale angegeben. $P(7.6\ Hz) = 0{,}653\ W;\ P(15{,}4\ Hz) = 0{,}861\ W;\ P(23Hz) = 0{,}7219\ W;\ P(46\ Hz) = 0{,}77\ W$

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und an allen Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, mich auch keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Des Weiteren hat die Arbeit in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen."

Duisburg, 15.04.2022
Ort, Datum

Unterschrift