

Optimierung der Hard- und Software eines

induktiven Niederschlagssensors

Bachelorarbeit

für die Prüfung zum Bachelor of Science des Studiengang Elektrotechnik des Instituts Mess- und Sensortechnik der Hochschule Ruhr West Mülheim an der Ruhr

> Melvin Batalla Matrikelnummer: 10011413

> **Projektauftrag:** KIWaSuS Forschungsprojekt

Vergabe der Arbeit am: 24.01.2022

Abgabedatum am: 18.04.2022

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Himmel

Zweitprüfer/in:

Prof. Andreas Hennig

Betreuer/in:

Christoph Clemens

Essen, 17. April 2022



Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist die Optimierung der Soft- und Hardware eines induktiven Niederschlagssensors im Rahme des Verbundforschungsprojektes KIWaSuS (KIbasiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten). Auf Grundlage von Testergebnissen in einem Testlabor für Niederschläge ergeben sich Optimierungsansätze zur softwareseitigen Behebung von fehlerhaften Daten, eine hardwareseitige Steigerung der Qualität und der Empfindlichkeit des verwendeten induktiven Wirbelstromsensors und der Verbesserung des Wasserablaufes auf der Oberfläche des Sensorgehäuses. Zur Durchführung der Optimierung wurde empirisch das Ausführen des zugrunde liegenden Programmes auf mögliche Konflikte analysiert und angepasst, die Hardware des Sensors modifiziert und auf seine Empfindlichkeit überprüft sowie die Neigung und das Abdichtungskonzept des Gehäuses verändert und bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass kapazitive Anpassungen der Spule zu einer starken Stabilität des Sensors führen und eine hohe Resonanzfrequenz eine Steigerung der Empfindlichkeit hervorruft. Zusätzlich verhindert die Ausführung des Programmes auf zwei getrennten Mikrocontrollern das Auftreten fälschlicher Daten. Anpassungen des Sensorgehäuses durch die Erhöhung der Neigung und die Verwendung eines randlosen Abdichtungskonzeptes führen zu einem höheren Abfluss, aber zu keiner Eliminierung der Frequenzänderung aufgrund der Masse des aufliegenden Wassers. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Anpassungen der Software und der Spulenkonfiguration die Stabilität und Empfindlichkeit des Messsystems steigert.



Abstract

The subject of the work presented here is the optimization of the software and hardware of an inductive precipitation sensor within the framework of the joint research project KIWaSuS (AIbased warning system for heavy rain and urban flash floods). Based on test results in a test laboratory for precipitation, optimization approaches result for the software-side elimination of erroneous data, a hardware-side increase in the quality and sensitivity of the inductive eddy current sensor used and the improvement of the water runoff on the surface of the sensor housing. To perform the optimization, the execution of the underlying program was empirically analysed and adjusted for possible conflicts, the sensor hardware was modified and tested for sensitivity, and the slope and sealing design of the housing were modified and evaluated. The results show that capacitive adjustments to the coil result in strong stability of the sensor and a high resonant frequency causes an increase in sensitivity. Additionally, running the program on two separate microcontrollers prevents spurious data from occurring. Adjustments to the sensor housing by increasing the slope and using a rimless sealing design result in higher discharge, but no elimination of frequency change due to the mass of overlying water. The results show that mainly the adjustments of the software and the coil configuration increase the stability and sensitivity of the measurement system.



Inhaltsverzeichnis

	KurzfassungI		
AbstractII			
AbbildungsverzeichnisV			
Tabelle	enverzeichnisX		
Forme	verzeichnisXI		
AbkürzungsverzeichnisXIV			
Selbst	ständigkeitserklärungXVI		
Einleitu	ung1		
1.1	Aufgabenbereich2		
1.2	Ziele2		
2. En	twicklungstand3		
2.1	Messverfahren – induktives Wirbelstromverfahren		
2.2	Hardwarekomponenten4		
2.3	Softwarekomponenten6		
2.4	Messstand der Firma Lambrecht meteo GmbH7		
2.4	I.1 Versuchstaufbau und Durchführung7		
2.4	I.2 Ergebnisse der Messungen bei der Firma Lambrecht meteo GmbH8		
2.4	I.3 Schlussfolgerung der Messungen und Problemstellung11		
3. Th	eoretische Grundlagen / Analyse13		
3.1	Hardware13		
3.1	.1 induktives Wirbelstromverfahren13		
3	3.1.1.1 Eigenschaften des Parallelschwingkreises in Zusammenhang mit der Spule 13		
3	3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18		
	3.1.1.2Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material183.1.1.3Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
; ; 3.1	3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2 3.2 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 4. Op	 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 4. Op 4.1	3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material 18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens 23 1.2 Masseeffekt des Niederschlags auf der Membran 24 Software 25 2.1 ESP32-Architektur – Dual-Core 25 2.2 Impulszähler (PCNT) 26 2.3 Programmablauf 27 2.4 ESP-NOW Vergleichsmessung 28 2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Peak-Erzeugung 28 2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Mathematica 31 Programmablaufoptimierung – Peak-Unterdrückung 31		
3.1 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 4. Op 4.1 4.2	3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material 18 3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens 23 3.2 Masseeffekt des Niederschlags auf der Membran 24 Software 25 2.1 ESP32-Architektur – Dual-Core 25 2.2 Impulszähler (PCNT) 26 2.3 Programmablauf 27 2.4 ESP-NOW Vergleichsmessung 28 2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Peak-Erzeugung 28 2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Mathematica 31 Programmablaufoptimierung – Peak-Unterdrückung 31 Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration 31		





5.	Kor	nkret	isierung der Optimierungsansätze33	5
5	.1	Soft	ware33	3
	5.1.	1	Hardware-Timer	3
	5.1.	2	Double-Buffer / Ring-Buffer	ŀ
	5.1.	3	Semaphore / Mutex	5
	5.1.	4	Interrupt	;
	5.1.	5	Verhalten des PCNT (Impulszähler) während des Sendebetriebs	5
	5.1.	6	Hardwaretrennung von Sende- und Messverfahren	,
5	.2	Hard	dware	}
	5.2.	1	Anpassung des Sensorgehäuses zur Wasserablaufoptimierung	3
	5.2.	2	Einstellung der Spulenkonfiguration40)
	5.2.	3	Einstellung der Empfindlichkeit des Messsystems42	<u>}</u>
	5.2.	4	Konzeption des Systems zur Empfindlichkeitsbestimmung43	3
6.	Mes	sserç	gebnisse45	,
6	.1	Pro	grammablaufoptimierung/Peak-Unterdrückung45	;
6	.2	Spu	lenkonfiguration51	
	6.2.	1	Konfiguration Spule α	
	6.2.	2	Konfiguration Spule γ	5
	6.2.	3	Konfiguration Spule η	;
6	.3	Emp	ofindlichkeit des Messsystems62	<u>}</u>
	6.3.	1	Empfindlichkeit Spule α62	<u>,</u>
	6.3.	2	Empfindlichkeit Spule γ 64	ŀ
	6.3.	3	Empfindlichkeit Spule η	;
6	.4	Vers	such zur Masseneffektminimierung69)
	6.4.	1	Vergleich der Messdaten bei 2 mm Abstand mit 12°- und 25°-Neigung:69)
	6.4.	2	Vergleich der Messdaten bei 4 mm Abstand mit 12°- und 25°-Neigung:70)
7.	Dis	kuss	ion der Ergebnisse72	2
7	.1	Soft	wareoptimierung72	,
7	.2	Har	dwareoptimierung74	ŀ
	7.2.	1	Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration74	ŀ
	7.2.	2	Gehäuseanpassung zur Masseneffektminimierung76	;
8.	Zus	amn	nenfassung78	\$
9.	Aus	sblic	k79)
10. LiteraturverzeichnisX				
11. AnhangXIV				



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veranschaulichung des induktiven Wirbelstromprinzips durch die
Wechselwirkung zwischen primären und sekundären Magnetfeldern [20]
Abbildung 2: Schaltplan der Platine des bisherigen Entwicklungsstandes; links a):
Komparatorschaltung; rechts b): Anbindung an den Mikrocontroller (erstellt mit KiCad)4
Abbildung 3: Sensorgehäuse mit Halterung; unten: Sensorhalterung mit 12° Neigung für den
Wasserablauf; mitte: Gehäuseboden und Grundgehäuse mit Abflussrinne und
Wasserdurchlässe (hier: Elektronik nicht verbaut); oben: Dichtungsring mit
Wasserdurchlässe
Abbildung 4: schematischer Programmablaufplan (unter anderem auch in der Firma
Lambrecht meteo GmbH verwendet); Anhang (A) Programm Lambrecht6
Abbildung 5: Aufbau der Messeinrichtung der Firma Lambrecht meteo GmbH7
Abbildung 6: Messdaten von Spule β (100, 80, 60, 40 und 20 ml/min); 10 ml/min = 1 mm; Zeit
= Iteration x 10 ms9
Abbildung 7: Vergleich der Messdaten von 100 und 10 ml/min der Spule α ; Zeit = Iteration x
10 ms9
Abbildung 8: Regenereignissimulation Spule Alpha (Durchflussrate 0 - 135 - 0 ml/min); Zeit =
Iteration x 10 ms10
Abbildung 9: Regenereignissimulation Spule β (Durchflussrate 0 - 135 - 0 ml/min); Zeit =
Iteration x 10 ms11
Abbildung 10: links: realer Parallelschwingkreis mit den idealen Bauelementen C, sowie mit
den verlustbehafteten Bauelementen L und Rp; rechts: Ersatzschaltbild des
Parallelschwingkreises mit den idealen Bauelementen C und L und dem verlustbehafteten
Verlustwiederstand R ([25], S. 3)14
Abbildung 11: Schematischer Impedanzverlauf in Abhängigkeit der anliegenden Frequenz
des Parallelschwingkreises [6]15
Abbildung 12: Feldlinienverlauf im Luftspaltbereich ([1], S. 179)16
Abbildung 13: Frequenzabhängigkeit der verschiedenen Verlustmechanismen für eine
Beispielanordnung ([1], S. 100); Pprox Proximity-Verluste, RMS-Verluste Prms, Skin-
Verluste <i>Pskin</i> , Gesamtverluste <i>Pges</i> 18
Abbildung 14: Schemata zur Veranschaulichung des Wirbelstroms mit dem magnetischen
Vektorpotential Ar und $A\psi$ ([26], S. 386)
Abbildung 15: magnetisches Vektorpotential als Funktion des normierten Radius; links:
Erregerspule mit einer Windung; magnetisches Vektorpotenzial parallel zur Windung; rechts:
Erregerspule mit mehreren Windungen; magnetisches Vektorpotenzial verschiebt sich zur
Spulenmitte [5]21



Abbildung 16: Zusammenhang der abstandsabhängigen Gegeninduktivität und Frequenz;
Resonanzfrequenz der Spule ohne Bedämpfung: 5 MHz; parasitäre Kapazität: ca. 45 pF;
Induktivität der Spule: 24 μH [5]22
Abbildung 17: schematische Darstellung der Empfindlichkeit in Abhängigkeit des Abstandes
s; a: Abstand in mm; E: Empfindlichkeit; Δf : Frequenzdifferenz; fres: Resonanzfrequenz in
MHz; s: Bemessungsabstand der Empfindlichkeit23
Abbildung 18: unten: Frontalansicht mit Wasseransammlung im unteren Membranbereich;
oben: Querschnitt durch Membran und Dichtungsring24
Abbildung 19: Systemarchitektur des ESP32 Dual-Core-Systems mit PRO_CPU und
APP_CPU, welche sich die Speicher teilen ([7], S. 25)25
Abbildung 20: Impulszähler (PCNT) Architektur ([7], S. 488)26
Abbildung 21: System-Clock-Aufstellung für WiFi und Peripherie (Peri) ([7], S. 40)27
Abbildung 22: Frequenzmessung ohne Sendeverfahren mit einem Frequenzgenerator und
einer Frequenz von 1,36 MHz (Messung 1-Feb-2022 13.59.08)
Abbildung 23: Frequenzmessung mit Sendeverfahren mit einem Frequenzgenerator mit der
Frequenz von 1,36 MHz (Messung 1-Feb-2022 14.19.33)28
Abbildung 24: Schematischer Aufbau eines Ring-Buffers
Abbildung 25: Schematischer Ablauf des Semaphore-Verfahrens
Abbildung 26: schematischer Ablauf des Programmes mithilfe pegelgesteuerter Interrupts .36
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Verdrahtung zweier Mikrocontroller über die
serielle Schnittstelle UART
Abbildung 28: Kraftaufteilung an einer schiefen Ebene mit einer 25° Neigung
Abbildung 29: links: Eingespannte Membran über den Schraubschellenring; rechts:
Halterung mit 25°-Neigung für erhöhtem Wasserabfluss
Abbildung 30: oben: seitliche Ansicht der Spulenhalterung mit Abstandseinstellung; unten:
Gesamtansicht des eingesetzten Spulenhalters im Gehäuse
Abbildung 31: von links nach rechts: Spule α (WE 760308110), Spule γ (WE 760308111) und
Spule η (WE 760308101302) [36]40
Abbildung 32: Schematische Darstellung der Abstandseinstellung der Spulen
Abbildung 33: Agilent 4294A Precision Impedance Analyser, 40 Hz bis 110 MHz [14]42
Abbildung 34: links: Schrittmotor 17DRV014 [23]; rechts: Schrittmotorcontroller BSC203
[22]43
Abbildung 35: schematischer Aufbau der Messeinrichtung zur Ermittlung der
abstandsabhängigen Resonanzfrequenz43
Abbildung 36: Vergleichsmessung mit implementiertem Hardware-Timer mit und ohne das
Sendeverfahren ESP-NOW (links: Aufnahme 10-Apr-2022 18.01.06 rechts: Aufnahme 10-
Apr-2022 18.08.38)



Abbildung 37: exemplarische Vergleichsmessung mit implementiertem Ring-Buffer mit und				
ohne das Sendeverfahren ESP-NOW; dasselbe weist auch der Ring-Buffer auf				
Abbildung 38: Messsignal bei Verwendung des Mutex-Verfahrens; Peak-Erscheinung mit				
Frequenzanhebungen zwischen 50 - 100 kHz47				
Abbildung 39: Messsignal bei Verwendung der Interrupt-Methode (pegelgesteuert); Peak-				
Erscheinung mit Frequenzanhebungen zwischen 64 – 102,4 kHz47				
Abbildung 40: schematische Zeitabfolge mit und ohne Sendeverfahren ESP-NOW; a)				
Zeitablauf mit ESP-NOW; b) Zeitablauf ohne ESP NOW48				
Abbildung 41: Anzeige des Zeitwertes in ms der Ausführung der Operationen Overflow und				
Read PCNT zur Analyse der Zeitvariation des Impulszählers bei Verwendung von ESP-NOW				
Abbildung 42: Vergleich zwischen empfangenen und den gemessenen Messdaten bei der				
Trennung von Mess- und Sendeverfahren50				
Abbildung 43: absolute Frequenzänderung bei Annäherung der Hand bei einem Spulen-				
Membran-Abstand von 2 mm (Spule α ohne Kapazitätsanpassung) (Aufnahme: 31-Mar-2022				
17.40.56)				
Abbildung 44: Frequenzverlauf der Spule $lpha$ ohne Bedämpfung mit starker Schwankung der				
Frequenzamplitude (Peaks) von ca. 10 kHz52				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm-				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				
Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm- Bedämpfung				



Abbildung 55: Darstellung der berechneten Gegeninduktivitäten der Spule γ in Abhängigkeit
des Abstandes
Abbildung 56: Gegenüberstellung aller Spulenkonfigurationen der Spule η aus den
Messungen mithilfe des Impedanzanalysators mit 10 MHz-Schwelle67
Abbildung 57: Vergleich des Empfindlichkeitsverlaufes der Spulen η pro 0,1 mm-Schritt67
Abbildung 58: Vergleich der Gegeninduktivitäten der Spulenkonfigurationen (Spule η)68
Abbildung 59: Resultierende Frequenzdarstellung bei 2 mm Bedämpfungsabstand und 25°-
Neigung; links: Sensor ohne Dichtungsring; rechts: Sensor mit Dichtungsring
Abbildung 60: Resultierende Frequenzdarstellung bei 4 mm Bedämpfungsabstand und 25°-
Neigung; links: Sensor ohne Dichtungsring; rechts: Sensor mit Dichtungsring
Abbildung 61: Darstellung des Sensoraufbaues mit einer Trennung von Mess- und
Sendeverfahren durch zwei ESP32 Mikrocontrollern mit einer seriellen UART-Verbindung73
Abbildung 62: Darstellung der Resonanzfrequenzverläufe aller verwendeter Spulen (Spule α :
24 μH; Spule γ: 6,3 μH; Spule η: 5,3 μH) und deren Kapazitätsanpassungen in Abhängigkeit
des Abstandes74
Abbildung 63: Messdaten von Spule α (100, 80, 60, 40 und 20 ml/min); 10 ml/min = 1mmXXII
Abbildung 64: Periodogramm der Messung mit Sendeverfahren (Iteration 363 - 413) mit einer
durchschnittlichen Periodizität von 3,1 HzXXII
Abbildung 65: absolute Frequenzänderung bei Annäherung der Hand bei einem Spulen-
Membran-Abstand von 4 mm (Spule α ohne Kapazitätsanpassung) (Aufnahme: 31-Mar-2022
17.31.43XXIII
Abbildung 66 Messignal von Spule $lpha$ ohne Parallelkapazität bei einer Bedämpfung von 2
mm;XXIII
Abbildung 67: Messignal von Spule γ ohne Parallelkapazität bei einer Bedämpfung von 2
mm; Messignal weist eine Häufung von überhohen Peaks auf (bis zu 24 kHz) XXIV
Abbildung 68: Messignal von Spule γ mit einer Parallelkapazität von 330 pF bei einer
Bedämpfung von 2 mm; Messignal weist ein deutlich verrauschtes Signal auf mit einem
maximalen Peak von 155,5 kHz aufXXV
Abbildung 69: Messignal von Spule γ mit einer Parallelkapazität von 220 pF bei einer
Bedämpfung von 2 mm; Messignal weist vereinzelte Peaks und Frequenzeinbrüche auf. XXV
Abbildung 70: Messsignal der Spule γ im unbedämpften Zustand; oben: 100 pF-
Konfiguration; mitte: 150 pF-Konfiguration; unten: 220 pF-KonfigurationXXVI
Abbildung 71: Messsignal der Spule γ bei einer Bedämpfung mit 2 mm Abstand; oben: 100
pF-Konfiguration; unten: 150 pF-KonfigurationXXVII
Abbildung 72: Messsignal der Spule γ bei einer Bedämpfung mit 4 mm Abstand; oben: 100
pF-Konfiguration; mitte: 150 pF-Konfiguration; unten: 220 pF-KonfigurationXXVIII



Abbildung 73: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: keine Anpassung;
unten: 47 pF-Konfiguration
Abbildung 74: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: 56 pF-Konfiguration;
mitte: 68 pF-Konfiguration; unten: 100 pF-KonfigurationXXX
Abbildung 75: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: 150 pF-
Konfiguration; mitte: 220 pF-Konfiguration; unten: 330 pF-Konfiguration XXXI
Abbildung 76: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung; oben: Konfiguration
ohne Anppassung (Auftreten von überproportionalen Peaks); unten: 330 pF-Konfiguration
(Auftreten von überproportionalen Peaks bei einer 2 mm-Bedämpfung) XXXII
Abbildung 77: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung der Konfiguration
mit 47 pF, 56 pF, 68 pF und 100 pF Parallelkapazitäten XXXIII
Abbildung 78: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung; oben: 150 pF-
Konfiguration; unten: 220 pF-KonfigurationXXXIV
Abbildung 79: Tropfenmessung bei 2 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von
25° ohne Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 69XXXV
Abbildung 80: Tropfenmessung bei 2 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von
25° mit Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 69 XXXVI
Abbildung 81: Tropfenmessung bei 4 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von
25° ohne Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 71XXXVII
Abbildung 82: Tropfenmessung bei 4 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von
25° mit Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 71 XXXVIII



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Koeffizienten zur Approximation der Induktivität unter Einbezug der Geometrie [19]
Tabelle 2: Testmatrix zur Veranschaulichung der Testkombinationen zur Ermittlung der
Wirkung des Masseneffektes auf der Membran
Tabelle 3: Verwendete Muttern und Unterlegscheiben zur Höheneinstellung der Spulen für
die Abstände 2 und 4 mm41
Tabelle 4: Messergebnisse der Spule γ im unbedämpften Zustand mit den
Parallelkapazitäten 0 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; <i>fres</i> : Resonanzfrequenz, <i>C</i> :
Kapazität, δ : Eindringtiefe, Q : Güte
Tabelle 5: Messergebnisse der Spule γ mit Bedämpfung (2 mm) und mit den
Parallelkapazitäten 0 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; <i>fres</i> : Resonanzfrequenz, <i>C</i> :
Kapazität
Tabelle 6: Messergebnisse der Spule γ mit Bedämpfung (4 mm) und mit den
Parallelkapazitäten 100 pF, 150 pF und 220 pF; <i>fres</i> : Resonanzfrequenz, C: Kapazität55
Tabelle 7: Empfindlichkeiten E und Resonanzfrequenzen fres bei den Abständen 2 mm und
<i>4 mm</i> (Spule γ)65
Tabelle 8: Empfindlichkeiten E und Resonanzfrequenzen fres bei den Abständen 2 mm und
4 mm (Spule η)
Tabelle 9: Vergleich der Frequenzanhebung und der maximalen Peak-Höhe mit einem
Bedämpfungsabstand von 2 mm bei 12° und 25° Neigung70
Tabelle 10: Vergleich der Frequenzanhebung und der maximalen Peak-Höhe mit einem
Bedämpfungsabstand von 4 mm bei 12° und 25° Neigung71
Tabelle 11: Resonanzfrequenzen bei 2 mm und 4 mm der Spulen $lpha$ und η und die
Empfindlichkeit E bei 2 mm Abstand75
Tabelle 12: Messergebnisse der Spule η im unbedämpften Zustand mit den
Parallelkapazitäten 0 pF, 47 pF, 56, pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res:
Resonanzfrequenz, C: Kapazität, δ: Eindringtiefe, Q: Güte
Tabelle 13: Messergebnisse der Spule η mit Bedämpfung (2 mm) und mit den
Parallelkapazitäten 0 pF 47 pF, 56 pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res:
Resonanzfrequenz, C: KapazitätXL
Tabelle 14: Messergebnisse der Spule η mit Bedämpfung (4 mm) und mit den
Parallelkapazitäten 0 pF 47 pF, 56 pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res:
Resonanzfrequenz, C: KapazitätXLI
Tabelle 15: Messergebnisse aller verwendeten Kombinationen zur Bestimmung einer
geeigneten SpulenkonfigurationXLII





Formelverzeichnis

Formel 1: komplexe Impedanz des realen LC-Schwingkreises mit Drahtwiderstand R0 und
Verlustwiderstand Rp ([1], S 308)14
Formel 2: Resonanzfrequenzberechnung von Schwingkreisen (Reihen- und
Parallelschwingkreis) in Abhängigkeit von Induktivität L und Kapazität C14
Formel 3: Vereinfachung und Verdeutlichung der Gesamtimpedanz eines LC-Schwingkreises
im Resonanzfall $XL = XC$
Formel 4: "Expression Based on Current Sheet Approximation"-Formulierung zur
Berechnung der Induktivität einer Planarspule unterschiedlicher Geometrie bei minimalem
Verhältnis zwischen Abstand der Drähte und Drahtdicke ([4], S. 56)
Formel 5: Zusammenhang von Induktivität L und Kapazität C bei Resonanz des
Schwingkreises
Formel 6: Berechnung der Güte Q eines Parallelschwingkreises im Resonanzfall mit
Verlustwiderstand Rp , Induktivität L und Kapazität C ([25], S. 2)
Formel 7: Eindringtiefe δ in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz $fres$,, der spezifischen
Leitfähigkeit \varkappa , der magnetischen Feldkonstante $\mu 0$ und der Permeabilität μr ([1], S. 73)18
Formel 8: oben: magnetisches Vektorpotenzial A; mitte: radialer Vektor $Ar \stackrel{\circ}{\rightarrow}$ auf der Fläche
(target); unten: Azimuth-Vektor $A\psi$ auf der Fläche (target) ([26], S. 385) μ : Permeabilität; it:
zeitabhängiger Strom; dl1: infinitesimaler Abstand auf der Windung; DPQ: Betrag des Weges
PQ; <i>Rt</i> : Radius der Windung; <i>rk</i> : Radius des Ringes; <i>zt</i> : Abstand z-Achse
Formel 9: oben: Azimuth-Vektor $A\psi$ mit elliptischem Integral 1. (F) und 2. (E) Art unter
Substituierung von β ([26], S. 386)
Formel 10: Gegeninduktivität M der leitfähigen Platte aus dem magnetischen Fluss ψ in
Abhängigkeit des Stroms I; Alternative Beschreibung: Ringintegral des magnetischen
Vektorpotenzial A in Abhängigkeit des Stroms I [5]21
Formel 11: Gegeninduktivität M unter Berücksichtigung des magnetischen Vektorpotenzials
<i>Αψ</i> ([26], S. 390)21
Formel 12: Antiproportionaler Zusammenhang zwischen Selbstinduktivität L und
Resonanzfrequenz fres
Formel 13: Rückführung der ursprünglichen Gesamtinduktivität Lges aus der Summe von
Induktivität L und Gegeninduktivität M23
Formel 14: antiproportionaler Zusammenhang zwischen Eindringtiefe δ und
Resonanzfrequenz fres
Formel 15: Empfindlichkeit E in Abhängigkeit der Differenz Δf zweier benachbarter
Resonanzfrequenzen und dem Abstand <i>s</i> zwischen diesen Resonanzfrequenzen
Formel 16: Gewichtskraft Fg einer Wassermasse von $m = 140$ g24



Formel 17: Berechnung der Kraftwirkung eines Regentropfens mit der Masse m = 0,03 g auf
eine 25° geneigte Oberfläche; FG : Gewichtskraft; $F \perp$: Normalenkomponente der
Gewichtskraft; <i>FE</i> : Hangantriebskraft; $FG = 3 \cdot 10 - 4 kg \cdot 9,81ms2 = 2,943 \cdot 10 - 4 N \dots 38$
Formel 18: Berechnung der erforderlichen Resonanzfrequenz für eine maximale
Eindringtiefe von 0,2 mm41
Formel 19: Berechnung der Impedanz Z aus den Beträgen des Realteils (Re) und
Imaginärteils (Im) der Messungen42
Imaginärteils (Im) der Messungen



Abkürzungsverzeichnis

$\left \overrightarrow{D_{PQ}}\right $: Betrag des Weges PQ [m]
$\overrightarrow{A_r}$: radialer Vektor, des magnetischen Vektorpotenzials [Vs/m]
$\overrightarrow{A_{\psi}}$: Azimuth-Vektor des magnetischen Vektorpotenzials [Vs/m]
d_{avg}	: mittlerer Gesamtdurchmesser (Spule) [m]
Ă	: magnetisches Vektorpotenzial [Vs/m]
F_{\perp}	: Normalenkomponente der Gewichtskraft [N]
F _E	: Hangantriebskraft [N]
F _G	: Gewichtskraft [N]
$Im(\underline{Z})$: Imaginärteil der Impedanz Z [Ω]
L _{gmd}	: Induktivität einer Spiralflachspule [H]
R ₀	: Drahtwiderstand [Ω]
R_P	: Verlustwiderstand LC-Parallelschwingkreis [Ω]
$Re(\underline{Z})$: Realteil der Impedanz Z [Ω]
R _t	: Radius der Windung [m]
X _C	: Blindanteil des Wechselstromwiderstandes eines Kondensators [Ω]
X_L	: Blindanteil des Wechselstromwiderstandes einer Spule [Ω]
<u>Z</u>	: komplezxe Impedanz [Ω]
d_{in}	: Innendurchmesser (Spule) [m]
d _{out}	: Außendurchmesser (Spule) [m]
f _{res}	: Resonanzfrequenz [Hz]
r_k	: Radius des Ringes [m]
μ_0	: magnetische Feldkonstante [N/A²]



μ_r	: magnetische Permeabilität			
BMBF	: Bundesministeriums für Bildung und Forschung			
CPU	: Central Processing Unit			
dl_1	: infinitesimaler Abstand auf der Windung [m]			
ESP-IDF	: Espressif IoT Development Framework			
GPIO	: General Purpose Input/Output			
i(t)	: zeitabhängiger Strom [A]			
ISR	: Interrupt-Service-Routine			
KI	: Künstliche Intelligenz			
KIWaSuS	: KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten			
LoRa	: Long Range (Low Power)			
LoRaWAN	: Long Range Wide Area Network			
PCNT	: Pulse Counter (Impulszähler)			
Peak	: kurzeitige Erhöhung der Frequenz ausgehend von seiner Grundfrequenz			
PLA	: polylactic acid			
RMS	: root mean square			
RTOS	: Real Time Operationg System			
UART	: (Universal Asynchronous Reciever / Transmitter)			
USB	: Universal Serial Bus			
WiFi	: Wireless Fidelity			
С	: Kapazität [F]			
L	: Induktivität [H]			
L	: Selbstinduktivität [H]			
М	: Gegeninduktivität [H]			



Ν	: Windungszahl einer Spule
Q	: Güte
R	: ohmscher Anteil des Wechselstromwiderstandes einer Spule [Ω]
Ζ	: Impedanz [Ω]
f	: Frequenz [Hz]
g	: Erdbeschleunigung [m/s²]
m	: Masse [kg]
S	: Windungsabstand (Spule) [m]
w	: Drahtdicke (Spule) [m]
δ	: Eindringtiefe [m]
ρ	: Füllfaktor
ψ	: magnetischer Fluss [Vs]
ω	: Kreisfrequenz [Hz]
ω	: Kreisfrequenz [Hz]
κ	: elektrische Leitfähigkeit [S/m]



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Melvin Batalla, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Optimierung der Hard- und Software eines induktiven Niederschlagssensors

für das Forschungsprojekt KIWaSuS selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

sonden 17.04.22

Ort, Datum

Modella

Unterschrift



Einleitung

Für das Verbundforschungsprojekt KIWaSuS (KI-basiertes Warnsystem vor Starkregen und urbanen Sturzfluten) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist dem Institut Mess- und Sensortechnik der Hochschule Ruhr West in Mülheim an der Ruhr die Entwicklung und der Bau eines Low-Cost-Sensorsystems zur Niederschlagsmessung übertragen worden. Das Forschungsprojekt ist die notwendige Reaktion auf die Häufung von Unwettern, welche in den verdichtenden Räumen des urbanen Ruhrgebiets zu schlagartigen und unvorhersehbaren Überflutungen und Überschwemmungen führen. Die zentralen Ziele des Forschungsprojektes KIWaSuS sind die zeitlich und räumlich präzise Vorhersage von Starkregenereignissen, die Erzeugung eines verdichtenden Messnetzes in Ergänzung zu vorhandenen Wetterstationen zur genaueren Lokalisation von Starkregen und die sichere und gezielte Koordination des kommunalen Krisenmanagements [15]. Das dafür vorgesehene Messsystem beruht auf dem Messprinzip des induktiven Wirbelstromverfahrens - ein Konzept, welches bereits in vielen industriellen Anwendungsfällen in widriger Umgebung zur Abstandsmessung oder zur Detektion von Produktionsfehlern verwendet wird. Für eine großflächige Abdeckung eines Raumes ist eine Vielzahl an Sensoren notwendig, welche aufgrund finanzieller Aspekte eine günstige Preisgestaltung aufweisen sollen. Da sich das induktive Wirbelstromprinzip durch seine Einfachheit, aber auch durch seine Präzision ideal eignet, wird dieses Verfahren als Grundlage für das Sensorsystem verwendet.

In dieser Bachelorarbeit wird das bereits vorhandene Sensorsystem auf der Hard- und Softwareebene weiterentwickelt, um ein reproduzierbares, stabiles und eindeutiges Messergebnis zu erhalten, welches anschließend weiterverarbeitet werden kann (Filteralgorithmen, Zuordnung zu Niederschlagsintensitäten usw.). Der induktive Sensor ist grundsätzlich in der Lage, Niederschläge in Form von differenziellen Frequenzänderungen zu detektieren. Es stellte sich heraus, dass bei Messungen im Testlabor der Firma Lambrecht meteo GmbH unerwünschte Effekte auftreten:

- Überempfindlichkeit gegenüber äußeren kapazitiven Einflüssen
- Verhaltensänderung durch die Ansammlung von Regenwasser auf der Membran
- Ausbildung von vereinzelten und extremen Frequenzschwankungen ohne Anwesenheit eines Regenereignisses
- geringe Stabilität und Empfindlichkeit des Sensorsystems

Die aufgeführten Effekte minimieren die Empfindlichkeit des Sensors und die Aussagekraft der Ergebnisse, welche zur Analyse und Bewertung eines Regenereignisses höchste Relevanz besitzen und für die Weiterverarbeitung behoben sein müssen.



1.1 Aufgabenbereich

Im Zuge des Forschungsprojektes KIWaSuS ist das Institut Mess- und Sensortechnik der Hochschule Ruhr West mit der Entwicklung eines Low-Cost-Regensensors beauftragt worden. Die Grundlage dieser Bachelorarbeit beruht auf den Ergebnissen der Ausarbeitungen des Praxissemesters mit dem Thema "Entwicklung eines induktiven Low-Cost-Sensorsystems zur Messung von Niederschlägen" [2]. Zusätzlich gehen Ausführungen der parallel entstehenden Bachelorarbeit mit dem Thema "Signalanalyse und -auswertung der Messdaten eines induktiven Niederschlagssensors" an der Hochschule Ruhr West in Mülheim an der Ruhr von Herrn Bödder in die Bearbeitung ein [3]. Die Themenfelder sind dennoch voneinander abgegrenzt, sodass die Optimierung der Hard- und Software auf der signalerzeugenden Seite in dieser Bachelorarbeit behandelt wird. Die Verarbeitung des Signals ist in der Bachelorarbeit von Herrn Bödder thematisiert. Eine weitere Grundlage bilden die Messungen innerhalb der Produktionsstätte der Firma Lambrecht meteo GmbH aus Göttingen. Die Ergebnisse und Erkenntnisse fließen entscheidend in die Weiterentwicklung des Wirbelstromsensors ein. Relevante Bestandteile zur Erzeugung und der Wiedergabe von Rohwerten in Form von Resonanzfrequenzen einer Spule sind im Fokus dieser Arbeit. Die anschließende Analyse und Filterung aus diesen erhaltenen Resonanzfrequenzen sowie ihre Zuordnung zu Niederschlagsintensitäten sind nicht Thema dieser Arbeit.

1.2 Ziele

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Optimierung der bereits genannten Aspekte auf der Hardund Softwareebene sowie eine eindeutige Bestimmung der Konfiguration der Spule und dem Abstand von dieser zur Membran, um eine geeignete Empfindlichkeitseinstellung zu generieren. Daher steht die Lösbarkeit der erkannten Probleme und der offenen Konfigurationen auf analytischer (wissenschaftliche Erklärung) und auf praktischer Ebene (Umsetzung der Lösungsansätze und Erklärungen) im Fokus. Letztlich dienen diese Optimierungen und Anpassungen dazu, ein reproduzierbares, stabiles und eindeutiges Messergebnis zu erhalten, welches anschließend weiterverarbeitet werden kann. Weitere Ziele in Bezug auf das KIWaSuS-Projekt sind der autarke Einsatz des Sensors und die Beständigkeit des Sensorgehäuses gegenüber Wettereinflüssen. Eine Lösung zum autarken Einsatz ist bereits mit einer Lademöglichkeit via Solarpanel gelöst und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit (wesentliche Ausführungen des Praxissemesterberichtes [2]). Das Sensorgehäuse in seiner grundlegenden Form ist aufgrund der Erfahrungen aus den Messungen bei der Firma Lambrecht meteo GmbH anzupassen, da eine Wasseransammlung auf dem Sensor die Messungen verfälscht.



2. Entwicklungstand

Zur Einordnung und Bewertung der Weiterentwicklung und Optimierung des induktiven Wirbelstromsensors folgt die Darstellung des Entwicklungsstandes vor der Bearbeitung, um Problemstellungen aufzuzeigen und ihre notwendige Behebung hervorzuheben. Dazu tragen maßgeblich die Messergebnisse aus dem Testlabor der Firma Lambrecht meteo GmbH aus Göttingen bei.

2.1 Messverfahren – induktives Wirbelstromverfahren

Das verwendete Messverfahren ist das induktive Wirbelstromverfahren. Im Grunde "besteht [das Verfahren] aus konzentrierten elektrischen Bauelementen, die von der Wechselwirkung des elektromagnetischen Feldes des Messaufnehmers mit dem Messobjekt abhängen" ([27], S. 101). Das von der Spule erzeugte elektromagnetische Wechselfeld (Primärfeld) indiziert gemäß dem Induktionsgesetz eine Spannung in das "[...] permeable und/oder elektrisch leitfähige Messobjekt" ([24], S. 583) und führt zur Ausbildung von Wirbelströmen. Die auftretenden Wirbelströme erzeugen selbst "[...] ein magnetisches Gegenfeld (Sekundärfeld), dass dem erregenden Primärfeld entgegenwirkt" ([24], S. 584). Als Endresultat ändert sich die komplexe Spulenimpedanz der Spule, welche wiederum die Resonanzfrequenz beeinflusst (siehe Abbildung 1). Für die Messung von Niederschlägen ist besonders das Verhältnis zwischen der Abstandsänderung und der resultierenden Frequenzänderung von Interesse.



Abbildung 1: Veranschaulichung des induktiven Wirbelstromprinzips durch die Wechselwirkung zwischen primären und sekundären Magnetfeldern [20]

Das induktive Wirbelstromverfahren eignet sich aus mehreren Gründen zur Nutzung in einem Niederschlagsensor. Die geforderten Anforderungen sind die Robustheit des Systems, eine hohe Messempfindlichkeit und der kostengünstige Aufbau. Da es sich bei dem induktiven Wirbelstromverfahren um ein kontaktloses Messverfahren handelt, ist die Detektion des Niederschlags indirekt über eine abstandsabhängige Frequenzänderung festzustellen. Somit



ist kein mechanisches Element vorhanden, welches mit der Nutzung Verschleißerscheinungen aufweisen kann. Das Messverfahren bietet eine sehr hohe Empfindlichkeit bei optimaler Abstandskonfiguration des Systems, was im Wesentlichen von den verwendeten Materialien abhängig ist. Der Aufbau eines induktiven Wirbelstromsensors besteht aus einem Schwingkreis, welcher mit einem Komparator und der Spule selbst realisiert ist. Beide Komponenten sind günstig zu erwerbende elektrische Basiskomponenten.

Der Entwicklungsstand der verwendeten Komponenten vor der Bearbeitung dieser Bachelorarbeit ist im nächsten Abschnitt detailliert dargestellt. Dazu wird auf die Komponenten des Schwingkreises eingegangen und welche Konfiguration für Messungen von Regenereignissen verwendet wird.

2.2 Hardwarekomponenten

Zur Erzeugung eines magnetischen Wechselfeldes besteht ein Schwingkreis aus einer Spiralflachspule und einem Komparator. Die Spule der Firma WE (Würth Elektronik) besitz eine Induktivität von 24 µH [33]. Der verwendete Komparator LT1711 der Firma LT (Linear Technology) ist ein Rail-to-Rail Komparator, welcher am ausgekoppelten Ausgang nahezu die Versorgungsspannung von 3,3 V aufrecht hält [17]. Neben den zur Beschaltung des Komparators und zum Festlegen des Stromes der Schaltung verwendeten Widerständen ist zusätzlich ein Elektrolytkondensator (10 µF) und Tantalkondensator (100 nF) zur Pufferung bei Spannungsschwankungen eingesetzt (siehe Abbildung 2). Diese Komponenten sind fest auf einer Platine verlötet und sind über einen Koaxialkonnektor mit der Spule verbunden (siehe Schaltplan Abbildung 2). Außerdem ist ein Steckplatz für das verwendete Entwicklungsboard Heltec WiFi LoRa 32 (V2) bereitgestellt. Das Entwicklungsboard selbst verfügt über den Dual-Core-Mikrocontroller ESP32, Lithium-Batterie-Management zum ein Laden eines Akkumulators sowie den Chip SX1276 zur Verwaltung der LoRa-Kommunikation [12]. Der



Abbildung 2: Schaltplan der Platine des bisherigen Entwicklungsstandes; **links a):** Komparatorschaltung; **rechts b):** Anbindung an den Mikrocontroller (erstellt mit KiCad)



Mikrocontroller ESP32 verfügt über einen 16-bit PCNT-Register (Puls Counter), welches steigende und fallende Flanken eines Signals detektiert und zählt [9]. Da die späteren Daten über LoRa versendet werden, ist aufgrund des verbauten LoRa-Chips ein Kommunikationskanal gegeben, um den Verbindungsaufbau in ein vorhandenes LoRaWan-Netzwerk aufzubauen.

Zur Vorbereitung auf eine Regenintensitätsmessung im Labor der Firma Lambrecht meteo GmbH ist die verwendete Spule angepasst worden. Parallel zu den Windungen der Spule ist ein Keramikkondensator mit einer Kapazität von 560 pF verbaut. Es stellt sich unbedämpft eine Resonanzfrequenz von 1,3755 MHz ein. Empirisch ist mithilfe dieser Konfiguration das Verhalten des Sensors insofern stabilisiert, dass dieser ohne Niederschlag wenig Schwankung in der absoluten Frequenz aufweist.

Das Gehäuse des Sensors ist wasserdicht konzeptioniert und besteht aus drei Bestandteilen (siehe Abbildung 3), welche mit einem 3D-Drucker angefertigt sind. Das verwendete Filament der Firma extruder weist ähnliche Eigenschaften wie PLA (polylactic acid) auf und ist bis 75 °C hitzebeständig [10]. Auf der Bodenplatte ist die Elektronik bestehend aus dem Akkumulator, der Platine mit dem Schwingkreis, das Entwicklungsboard von Heltec und



Abbildung 3: Sensorgehäuse mit Halterung; **unten:** Sensorhalterung mit 12° Neigung für den Wasserablauf; **mitte:** Gehäuseboden und Grundgehäuse mit Abflussrinne und Wasserdurchlässe (hier: Elektronik nicht verbaut); **oben:** Dichtungsring mit Wasserdurchlässe

die Spule verbaut. Zudem sind Schalter für das Ab- und Anschalten des Geräts sowie Anschlüsse für ein Solarpanel und ein USB-A-Anschluss zum Programmieren des Mikrocontrollers in der Bodenplatte eingelassen. Das Gehäuse mit eingebauter Ablaufrinne zur Ableitung von kondensierendem Wasser und den dazugehörigen Wasserablässen ist mit der Bodenplatte fest verschraubt und ist mit einer Dichtung abgeschlossen. Der Dichtungsring ist auf der Oberseite des Gehäuses ebenfalls fest verschraubt. Zwischen Gehäuse und Dichtungsring ist die 0,2 mm dicke Edelstahlmembran gespannt, welche vom Gehäuse und dem Dichtungsring zusätzlich mit einer Schaumstoffdichtung abgesichert ist. Aus Stabilitätsgründen bildet der Dichtungsring eine 5,5 mm hohe Kante. Um den Wasserablauf auf der Membran sicher zu stellen, sind Durchlässe in diesem eingelassen.

Die Spule ist mit einem Abstand von 2 mm zur Edelstahlmembran angebracht. Daraus resultiert – im Zusammenhang mit der Konfiguration der Spule – eine Resonanzfrequenz von



1,77 MHz. Der gesamte Sensor ist auf eine Halterungsvorrichtung aufgesteckt und fixiert, welche zum Ablauf von Wasser eine eingestellte Neigung von 12° aufweist (siehe Abbildung 3 unten). Der Halter ist über vier Stellschrauben auf beliebige Stangen aufsetzbar, welche max. einen Durchmesser von 70 mm aufweisen dürfen.

2.3 Softwarekomponenten

Das von dem Schwingkreis generierte Signal ist über den Ausgang des Komparators an den Mikrocontroller geführt. Das Programm ist über Arduino IDE angefertigt, wobei die Syntax zur Programmierung des Mikrocontrollers ESP32 dem der Programmierungebung ESP-IDF entspricht, welche die Programmiersprache C / C++ nutzt. Das Programm zählt mithilfe des 16-bit PCNT die Anzahl der steigenden und fallenden Flanken des Signals innerhalb von 10 ms. Ein Software-Timer löst nach Ablauf dieser Zeit eine Funktion zum Pausieren des PCNT aus (Abbildung 4). Anschließend finden die Berechnung sowie das Senden der Daten über das Übertragungsprotokoll ESP-NOW statt (Abbildung 4). ESP-NOW ist ein Protokoll, welches



Abbildung 4: schematischer Programmablaufplan (unter anderem auch in der Firma Lambrecht meteo GmbH verwendet); Anhang (A) Programm Lambrecht



auf einer Frequenz von 2,4 GHz Daten direkt an andere gekoppelte Geräte Peer-to-Peer überträgt. Vorteil gegenüber dem Einsatz von WiFi ist eine schnelle, sichere und stromsparende Übertragung von Daten [8]. Nach einer Verzögerung von 2 ms zur Pufferung von asynchronen Prozessen ist der PCNT wieder freigegeben und der Timer startet erneut. Für die Analyse der Rohfrequenzdaten ist die Nutzung von ESP-NOW vorzuziehen, da eine Übertragung der Frequenzwerte alle 10 ms gewährleistet ist. Das Sendeverfahren LoRa kann aufgrund seiner längeren Übertragungsinitialisierung dieses Sendeintervall nicht einhalten, was zu Verlusten von Daten führt ([2], S. 51). Letztlich werden in späteren Entwicklungsstadien berechnete Niederschlagsintensitäten übermittelt, welche in längeren Intervallen versendet werden. Für eine detaillierte Verlaufsdarstellung von Regentropfen ist eine Abtastrate von 10 ms gewählt.

2.4 Messstand der Firma Lambrecht meteo GmbH

In Kooperation mit der Firma Lambrecht meteo GmbH aus Göttingen konnten Messungen mit der soeben vorgestellten Konfiguration des Sensors durchgeführt werden. Als Versorger von verschiedenen Niederschlagssensorsystemen für den Deutschen Wetterdienst ist Lambrecht meteo GmbH mit seiner einschlägigen Erfahrung ein idealer Partner. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Aufbau dieser Vorrichtung und die Durchführung erläutert und Ergebnisse dargestellt und bewertet. Die Messdaten zu den Ergebnissen sind dem Zusatzanhang (a) zu entnehmen. Das gesamte Programm ist dem Zusatzanhang (A) zu entnehmen.

2.4.1 Versuchstaufbau und Durchführung

Zur Testuna und Kalibrierung des wiegenden Niederschlagssensors rain[e] verwendet die Firma Lambrecht meteo GmbH eine eigens entwickelte Konstruktion. Diese hat die Aufgabe, eine bestimmte Menge Wasser pro Minute über eine rotierende Scheibe im Trichter des rain[e] zu verteilen. um einen unregelmäßigen Niederschlag zu simulieren (Abbildung 5). Eine Peristaltikpumpe führt über flexible Schläuche das Wasser zu zwei Auslässen (Abbildung 5). Diese Pumpe gewährleistet einen persistierenden Wasserfluss mit einer Auflösung von mindestens 0,1 ml/min. Zur induktiven Erprobung des



Abbildung 5: Aufbau der Messeinrichtung der Firma Lambrecht meteo GmbH



Wirbelstromsensors ist die rotierende Scheibe deaktiviert. Dadurch fällt das ausströmende Wasser senkrecht auf die Sensormembran (Abbildung 5). Durch ein definiertes Volumen des Auslasses sind die resultierenden Tropfen nahezu gleichgeformt. Lediglich die Häufigkeit der Tropfen ändert sich mit der Erhöhung der Durchflussrate. Der Sensor ist in einer Wanne am Boden fixiert (Abbildung 5). Die Wanne ist gleichzeitig eine Waage, welche die hauseigenen Sensoren zur Kalibrierung und Kontrolle wiegt. Zum Vergleich wurden zwei verschieden Sensorkonfigurationen erprobt:

- Modifizierte Spule α (unbearbeitet mit einer Resonanzfrequenz von 5 MHz):
 - Zusätzliche parallele Kapazität *C* = 560 pF
 - o Messabstand zwischen Spule und Membran: 2 mm
 - Resonanzfrequenz mit Membran: 1,77 MHz
- Modifizierte Spule β (unbearbeitet mit einer Resonanzfrequenz von 10 MHz):
 - Zusätzliche Parallele Kapazität C = 560 pF
 - o Messabstand zwischen Spule und Membran: 3 mm
 - Resonanzfrequenz mit Membran: 8,0031 MHz

Für Messungen der Spule α finden Durchflussraten zwischen 100 – 10 ml/min mit einer Erniedrigung von 10 ml/min (zehn Messdurchgänge) Anwendung. Für Messungen der Spule β finden Durchflussraten zwischen 100 -10 ml/min mit einer Erniedrigung von 20 ml/min (fünf Messdurchgänge) Anwendung. Innerhalb der Messreihen ist das auf der Membran befindliche Wasser nicht entfernt worden. Anschließend ist mit beiden Konfigurationen ein entstehendes und abklingendes Regenereignis simuliert worden, indem die Durchflussrate von 0 auf 135 ml/min kontinuierlich erhöht und anschließend auf 0 ml/min abgesenkt worden ist.

2.4.2 Ergebnisse der Messungen bei der Firma Lambrecht meteo GmbH

Grundsätzlich sind bei den Messungen beider Spulen - bei erhöhter Wasseransammlung auf der Membran - eine Erhöhung der absoluten Frequenz zu erkennen. Bei einem starken Abfluss des Wassers sinkt die resultierende Resonanzfrequenz wiederum. Besonders zu Beginn der Messungen mit 100 ml/min ist dieses Verhalten markant (siehe Abbildung 63 Anhang). Die Resonanzfrequenz der Spule α bei 100 ml/min steigt nach einem kurzen sinkenden Verlauf kontinuierlich von ca. 1,719 MHz auf 1,725 MHz an (Frequenz der Spule β steigt von 7,7599 MHz auf 7,8987 MHz an). Zuvor befindet sich kein Wasser auf der Membran. Im Verlauf - mit sinkender Durchflussrate der Peristaltikpumpe - verringert sich das sprunghafte Verhalten zu Beginn der Messung. Insgesamt erreicht die Spule α eine Resonanzfrequenz im Mittel aller Durchläufe von 1,725 MHz in Anhängigkeit der Wassermenge auf der Membran. Bei der Spule β ist eine hohe Streuung der absoluten Frequenzwerte zum Ende der jeweiligen Messung erkennbar (siehe Abbildung 6).





Abbildung 6: Messdaten von Spule β (100, 80, 60, 40 und 20 ml/min); 10 ml/min = 1 mm; Zeit = Iteration x 10 ms

Die Messung von 100 ml/min der Spule β endet bei einer Frequenz von 7,7971 MHZ, wobei bei einer Durchflussrate von 20 ml/min eine Frequenz von 7,9779 MHz resultiert. Außerdem steigt die absolute Resonanzfrequenz der Spule β bei 80 ml/min massiv an (siehe Abbildung 6).

Im Vergleich zwischen 100 und 10 ml/min Durchflussrate der Spule α sind die Unterschiede der Amplitudenhöhe der gemessenen Signale deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 7). Subjektiv lässt sich auf eine niedrigere Niederschlagsintensität bei 10 ml/min schließen, da die



Abbildung 7: Vergleich der Messdaten von 100 und 10 ml/min der Spule α; Zeit = Iteration x 10 ms



Peaks des Signals verglichen mit dem Niederschlag von 100 ml/min geringer ausfallen. Allerdings ist der genaue Zeitpunkt des Einsetzens des Niederschlages nicht erkennbar. Die Auswertung der Amplituden ist durch vereinzeltes Auftreten von überproportionalen Amplitudenausschlägen stark erschwert. Der maximale Peak in einem homogenen Abschnitt ohne Extrema der 100 ml/min Messung der Spule α ergibt einen maximalen Amplitudenausschlag von 3600 Hz. Der maximale Amplitudenausschlag bei 10 ml/min beträgt 2200 Hz. Der Unterschied des maximalen Amplitudenausschlags ist gegenüber dem zehnfachen Unterschied der Durchflussrate sehr gering, was für eine zu geringe Empfindlichkeit spricht.

Die Messungen der Spule β zeigen ein ähnliches Bild. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen abnehmender Niederschlagsintensität und der Veränderung der Amplitude deutlich schlechter nachzuvollziehen. Die Messungen bei 80 ml/min ist hervorzuheben, da diese mit den restlichen Messungen nicht übereinstimmt. Außerdem sind die Amplituden bei sinkender Niederschlagsintensität nicht proportional zu dieser (siehe Abbildung 6). Auch hier spricht es für eine zu geringe Empfindlichkeit des Systems.



Abbildung 8: Regenereignissimulation Spule Alpha (Durchflussrate 0 - 135 - 0 ml/min); Zeit = Iteration x 10 ms

Die Regenereignissimulationen beider Spulenkonfigurationen weisen dieselben Effekte auf, die bereits beschrieben wurden. Die Messdaten der Spule α zeigen einen erkennbaren Verlauf des Niederschlags (siehe Abbildung 8). Dort ist der Amplitudenausschlag bei der stärksten Niederschlagsintensität am größten und sinkt mit abnehmender Niederschlagsintensität. Die Variation der absoluten Resonanzfrequenz aufgrund der Wassermasse ist hier ebenfalls vorhanden. Die Messdaten der Spule β weisen kaum Änderungen der Amplituden auf (siehe



Abbildung 9). Es ist lediglich eine Schwankung der absoluten Resonanzfrequenz zu verzeichnen. Anhand dieser Messdaten ist kein Niederschlag zuordbar.



Abbildung 9: Regenereignissimulation Spule β (Durchflussrate 0 - 135 - 0 ml/min); Zeit = Iteration x 10 ms

In allen Messungen – unabhängig der Spulenkonfiguration – sind markante und überdurchschnittlich hohe Amplitudenausschläge erkennbar, welche zum Teil auch dann aufgetreten, wenn kein Niederschlag fällt. Zusätzlich weist das Messsignal periodische Peaks auf, welche eine Höhe zwischen 1 – 10 kHz aufweisen. Diese überlagern und verfälschen das zu messende Signal.

2.4.3 Schlussfolgerung der Messungen und Problemstellung

Die Messungen des induktiven Wirbelstromsensors zur Niederschlagsdetektion bei der Firma Lambrecht meteo GmbH zeigen, dass das Messsystem in dieser Konfiguration nicht genügend Aussagekraft bietet und unerwünschte Verhaltensweisen verursacht:

- 1. Die Empfindlichkeit des Sensors bezogen auf die abstandsabhängige Frequenzänderung ist zu gering.
- 2. Das System ist zu empfindlich gegenüber äußeren kapazitiven Einflüssen.
- 4. Das Messsignal generiert übermäßig hohe Amplitudenausschläge, welche periodisch auftreten.

Aus diesen Gründen ist die Aussagekraft der Daten vermindert, da die Messergebnisse nicht eindeutig sind und Messdaten verfälscht werden. Für das Messsystem im Allgemeinen ist ein



stabiles und reproduzierbares Signal von großer Bedeutung, um anschließend keine weiteren Einflussfaktoren in der Filterung des Signales zu haben.

Die grundlegende Festsetzung der Empfindlichkeit des Systems ist notwendig. Dazu werden Messungen erstellt, anhand dessen die abstandsabhängige Frequenzänderung untersucht wird, um zu bewerten, welche Abstände für eine bestimmte Spulenkonfiguration sinnvoll erscheint.

Für die Stabilität des Messsystems ist eine Anpassung der Konfiguration der Spule erforderlich, damit äußere Einflüsse wenig Einfluss auf das Messsignal ausüben. Dazu ist es notwendig, das Verhalten der Spule in Abhängigkeit der resultierenden Frequenz und Eindringtiefe sowie der resultierenden Güte zu betrachten. Daraus lassen sich Schlüsse einer geeigneten Spulenkonfiguration ziehen.

Grundsätzlich soll das Wasser sich nicht auf der Membran ansammeln können. Der jetzige Aufbau der Gehäuseoberseite führt – trotz Wasserablässen – zu einer zu hohen Wasseransammlung auf der Membran. Um unerwünschte Effekte wie die erhöhte Resonanzfrequenz und die Dämpfung des Aufpralles durch aufliegende Wässer zu minimieren, sind Anpassungen des Gehäuses notwendig.

Die periodischen Schwankungen und vereinzelten Peaks überlagern das Messsignal und verhindern eine adäquate Aussage und Analyse. Eine Schwankung des Signals von wenigen 100 Hz ist für die Messung hinnehmbar, zumal der Sensor bei einer Abtastrate von 10 ms eine Genauigkeit von 100 Hz aufweist. Dieses Verhalten wird angestrebt. Die Ausarbeitung der Bachelorarbeit von A. Bödder behandelt die Analyse des Signals zur Filterung [3]. Darin ist erkannt und dargestellt, dass die periodisch auftretenden Amplitudenausschläge durch die Software bzw. durch den Mikrocontroller ESP32 verursacht werden. Dazu ist das Messsignal über eine MATLAB-Anwendung mit einem Periodogramm analysiert worden. Es zeigte sich, dass in jeder Messung der Spule α ein periodisches Signal von 4 Hz präsent war. Da der Sensor zwischen den Messungen nicht abgeschaltet wurde, ist diese Periodizität immer vorhanden. Die Periodizität stellt sich nach jedem Neustart neu ein, sodass auch andere Frequenzen bedient werden. Diese Bachelorarbeit untersucht diese These, welche einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung des Systems darstellt.



3. Theoretische Grundlagen / Analyse

Den vorangegangenen Schlussfolgerungen und Problemstellungen liegen mathematische und physikalische Gesetzmäßigkeiten zugrunde. Um einen Optimierungsansatz festhalten zu können, müssen die Zusammenhänge der Komponenten und ihre Funktionsweise als Grundlage des Messsystems erläutert werden. Dazu erfolgt die Beschreibung und Analyse von Hard- und Software getrennt voneinander.

3.1 Hardware

Die Grundlage des Messsystems bilden die Hardwarekomponenten. Anhand ihrer Eigenschaften beeinflussen diese maßgeblich die Funktionalität und Leistung des induktiven Wirbelstromverfahrens. Auf der Hardwareebene wird zwischen dem induktiven Wirbelstromverfahren und dem Masseneffekt des Niederschlages unterschieden.

3.1.1 induktives Wirbelstromverfahren

Der Kern des Messsystems baut auf dem induktiven Wirbelstromverfahren auf. Die Funktionsweise ist von den verwendeten Komponenten, deren Parametern und der Kopplungsbeziehung zueinander abhängig. An dieser Stelle werden die Eigenschaften der Spule, der leitfähigen Membran und der Beziehung zueinander verdeutlicht und aufgearbeitet. Anschließend wird auf die Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens eingegangen.

3.1.1.1 Eigenschaften des Parallelschwingkreises in Zusammenhang mit der Spule

Der hier verwendete Schwingkreis ist ein LC-Parallelschwingkreis. Die Induktivität *L* der Spule und die parasitäre Kapazität *C* zwischen den Windungen bilden eine Parallelanordnung, in der die magnetische Feldenergie der Spule und die elektrische Feldenergie des Kondensators oszillieren und abhängig der Spulenparameter *L* und *C* eine charakteristische Resonanzfrequenz erzeugt ([11], S. 249). Da es sich um einen realen und verlustbehafteten Schwingkreis handelt, muss dieser kontinuierlich von einem Rail-to-Rail Komparator aufrechterhalten werden. Außerdem ist der Komparator LT1711 der Firma LT in der Lage, bis zu 100 MHz Toggle-Frequenz bei einer durchschnittlichen Laufzeitverzögerung von 4,5 ns zu erreichen ([17], S. 3). Somit können aus Sicht des Schwingkreises hohe Frequenzen erreicht werden. Die resultierende Resonanzfrequenz des realen LC-Parallelschwingkreises ist in erster Linie von der realen Induktivität und der realen Windungskapazität abhängig. Ein realer Parallelschwingkreis mit der Induktivität *L* und der Wicklungskapazität *C* ist ein verlustbehaftetes System (siehe Abbildung 10 links). R_0 stellt denn Drahtwiderstand der Spule dar und R_p den Verlustwiderstand, welcher die Verluste aufgrund hoher Frequenzen im Kern der Spule und dessen Wicklung beschreibt und stellt im Resonanzfall die maximale Impedanz



Abbildung 10: **links:** realer Parallelschwingkreis mit den idealen Bauelementen C, sowie mit den verlustbehafteten Bauelementen L und Rp; **rechts:** Ersatzschaltbild des Parallelschwingkreises mit den idealen Bauelementen C und L und dem verlustbehafteten Verlustwiederstand R ([25], S. 3)

dar ([1], S. 307). Betrachtet man die Induktivität L und die Wicklungskapazität C als ideale Bauelemente, so lässt sich ein Ersatzschaltbild erstellen, in dem die einzelnen Verluste im Verlustwiderstand R zusammengefasst sind ([25], S. 3) (siehe Abbildung 10 rechts). Das Ersatzschaltbild des Parallelschwingkreises "beschreibt [...] eine frequenzabhängige [Impedanz]" ([25], S. 3).

Dementsprechend tragen die Kapazität *C*, die Induktivität *L* und der Verlustwiderstand *R* frequenzabhängig zur Gesamtimpedanz der Spule bei. Werden die Verlustwiderstände frequenzabhängig berücksichtigt, so lässt sich der Betrag der Impedanz am Modell des realen Parallelschwingkreises wie folgt beschreiben:

$$\underline{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R_0 + j\omega L} + j\omega C + \frac{1}{R_p}}$$

Formel 1: komplexe Impedanz des realen LC-Schwingkreises mit Drahtwiderstand R0 und Verlustwiderstand Rp ([1], S 308)

Ein dämpfungsfreier LC-Schwingkreis stellt seine charakteristische Resonanzfrequenz f_{res} bei kontinuierlicher Anregung ein:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

Formel 2: Resonanzfrequenzberechnung von Schwingkreisen (Reihen- und Parallelschwingkreis) in Abhängigkeit von Induktivität L und Kapazität C

Bei Einstellung der Resonanzfrequenz sind die Blindwiderstände X_L (Induktanz) und X_c (Kapazitanz) betragsmäßig gleichgroß, sodass Z die Gesamtimpedanz darstellt, welche den maximalen Verlustwiderstand R_P repräsentiert:

HOCHSCHULE RUHR WEST UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_C} + \frac{1}{R_p}} \xrightarrow{X_L = X_C} Z = R_p \quad mit \ X_L = |X_C| \Leftrightarrow \left| -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot C} \right| = 2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot L$$

Formel 3: Vereinfachung und Verdeutlichung der Gesamtimpedanz eines LC-Schwingkreises im Resonanzfall $X_L = X_C$

Dabei ist $R_0 \ll R_P$, we shalb der Widerstand R_0 vernachlässigt werden kann. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz verhält sich der Schwingkreis induktiv ($X_L < X_C$) und oberhalb kapazitiv ($X_L < X_C$) [6]. Da sich in diesen Fällen die Blindwiderstände frequenzbedingt nicht aufheben, wirkt der Blindanteil gegenseitig dämpfend, Erniedrigung was eine der Gesamtimpedanz nach sich zieht (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Schematischer Impedanzverlauf in Abhängigkeit der anliegenden Frequenz des Parallelschwingkreises [6]

Die Einstellung der Resonanzfrequenz ist von den induktiven und kapazitiven Anteilen des Schwingkreises abhängig, welche durch die Eigenschaften der Spule definiert sind. Die Induktivität ist durch die Spulengeometrie (Durchmesser des Drahtes, den Abstand der Wicklungen und Form der Wicklung), die effektive Fläche, die Windungszahl und die relative Permeabilität des Kernmaterials definiert und einstellbar. Dies ist annäherungsweise mit der approximierten und modifizierten Wheeler-Formel darstellbar ([19], S. 1421), welche für planare Flachspulen gilt:

$$L_{gmd} = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot d_{avg} \cdot c_1}{2} \cdot \left(ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right) \quad mit \ \rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad ; \quad d_{avg} = \frac{d_{in} + d_{out}}{2}$$

Formel 4: "Expression Based on Current Sheet Approximation"-Formulierung zur Berechnung der Induktivität einer Planarspule unterschiedlicher Geometrie bei minimalem Verhältnis zwischen Abstand der Drähte und Drahtdicke ([4], S. 56)

Dabei bezeichnet ρ den Füllfaktor, d_{avg} den mittleren Gesamtdurchmesser, *N* die Anzahl der Windungen und $\mu = \mu_0$ die magnetische Permeabilität. Bei Verwendung von permeablen Kernmaterialien ist der Ausdruck $\mu = \mu_0$ mit der relativen Permeabilität μ_r des jeweiligen Materials in Abhängigkeit seiner Position im Spulenkern zu multiplizieren. Diese Formel berechnet die Induktivität "[...] basierend auf dem mittleren geometrischen und arithmetischen Abstand der stromführenden Schichten (im Englischen "geometric mean distance" - GMD)" ([4], S. 57).



Layout	<i>c</i> ₁	<i>C</i> ₂	<i>C</i> ₃	C ₄
quadratisch	1,27	2,07	0,18	0,13
hexagonal	1,09	2,23	0	0,17
octagonal	1,07	2,29	0	0,19
kreisförmig	1	2,46	0	0,20

Tabelle 1: Koeffizienten zur Approximation der Induktivität unter Einbezug der Geometrie [19]

Die Geometrie ist durch die geometrieabhängigen Koeffizienten $c_1 - c_4$ berücksichtigt.

Das Einführen eines permeablen Kernmaterials erhöht die Induktivität der Spule. Ein hochpermeables Material führt dazu, dass der magnetische Fluss im Wesentlichen durch ihn verläuft. Im Luftspalt über den Wicklungen stellen sich Streuflüsse ein (siehe Abbildung 12). "Infolge des Streuflusses ist die vom Fluss durchsetzte Querschnittsfläche […] im Bereich des Luftspalts größer als der dort tatsächlich vorliegende Schenkelquerschnitts [der Spule]" ([1], S. 171). Dieses Verhalten resultiert in einer Reduzierung des magnetischen Widerstandes und zur Erhöhung der Induktivität. Voraussetzung ist, dass sich das permeable Material im Kern der Spule befindet.



Abbildung 12: Feldlinienverlauf im Luftspaltbereich ([1], S. 179)

Der Effekt des kapazitiven Anteiles einer Spule setzt bei hohen Frequenzen ein und wird als parasitäre Kapazität bezeichnet. Aus diesem Grund stellt sich bei einer definierten Induktivität und einer durch die Geometrie bestimmten Kapazität eine charakteristische Resonanzfrequenz des Schwingkreises ein (siehe Formel 2). Dabei wird ein bestimmtes Verhältnis zwischen Induktivität L und Kapazität C eingehalten, was in der Untersuchung des Resonanzfalls sichtbar wird:

$$f_{res} = \frac{X_L}{2\pi \cdot L} = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot X_C}$$

Formel 5: Zusammenhang von Induktivität L und Kapazität C bei Resonanz des Schwingkreises

Bei einer bestimmten Resonanzfrequenz und den bekannten Blindwiderständen X_L und X_C besitzen L und C einen festen Wert. Durch eine Erhöhung der Kapazität C bei unveränderter Induktivität L verringert sich die Resonanzfrequenz des Schwingkreises im dämpfungsfreien



Zustand gemäß Formel 2. Gleichzeitig führt dies zu einer Erhöhung der Güte des Schwingkreises:

$$Q = R_p \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Formel 6: Berechnung der Güte Q eines Parallelschwingkreises im Resonanzfall mit Verlustwiderstand R_p , Induktivität L und Kapazität C ([25], S. 2)

Eine höhere Güte drückt aus, dass der Schwingkreis ein ideales Verhalten aufweist und die Verluste gering ausfallen. Dadurch folgt insgesamt ein stabiles Verhalten des Schwingkreises, was sich in einer geringeren Streuung der Frequenz im Resonanzfall widerspiegelt (verringerte Bandbreite). Ein hohes Verhältnis aus $\sqrt{\frac{c}{L}}$ beeinflusst im Wesentlichen die Güte, wobei insgesamt auch der Verlustwiderstand R_p durch eine kleinere Resonanzfrequenz geringer ausfällt. Neben der Änderung des Kernmaterials beeinflusst die Änderung der Kapazität die Eigenschaften des Schwingkreises bzw. der Spule.

Weitere Aspekte, die die Leistung der Spule selbst beeinflussen, sind ([1], S. 71):

- 1. frequenzunabhängige ohmsche (RMS-)Verluste,
- 2. frequenz- und drahtabhängige Skin-Verluste und
- 3. von einem äußeren Magnetfeld verursachte frequenzabhängige Proximity-Verluste.

Die <u>ohmschen RMS-Verluste</u> (root mean square) sind "[...] vom Effektivwert [...] des Stroms, von dem in der zeitabhängigen Stromform enthaltenen Oberschwingungsanteilen, von der Querschnittsform und -fläche des Wickelguts sowie vom Aufbau der Wicklung [abhängig]" ([1], S. 72). Da sich die Maße der Spulen in dieser Bearbeitung nur geringfügig unterscheiden, sind die RMS-Verluste nahezu identisch.

<u>Skin-Verluste</u> entstehen in einem wechselstromdurchflossenen Leiter bei hohen Frequenzen. Der aktive Bereich des Leiters besitzt - bezogen auf seinen Durchmesser - die höchste Stromdichteverteilung an der Drahtoberfläche (skin). Dies geschieht infolge eines durch den Strom hervorgerufenen magnetischen Feldes innerhalb des Drahtes. Das Feld steigt innerhalb des Drahtes linear mit dem Abstand von der Leitermitte an und erreicht sein Maximalwert an der Drahtoberfläche ([1], S. 73). Außerhalb des Drahtes nimmt sie mit dem Kehrwert des Abstandes ab. Mit steigender Frequenz nimmt die Stromdichte in der Mitte des Drahtes ab und wird an die Drahtoberfläche verdrängt ([1], S. 73). Es resultiert ein höherer Widerstand in der Leitermitte, welche die Verluste darstellen. Dieser Effekt bzw. Verlust ist von der Frequenz und den Eigenschaften des Materials abhängig und bestimmt die Eindringtiefe δ :



$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_{res} \varkappa \mu_r \mu_0}}$$

Formel 7: Eindringtiefe δ in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz f_{res} , der spezifischen Leitfähigkeit \varkappa , der magnetischen Feldkonstante μ_0 und der Permeabilität μ_r ([1], S. 73)

<u>Proximity-Verluste</u> entstehen in einem Leiter, wenn ein externes und zeitlich veränderliches Magnetfeld auf diesen wirkt ([1], S. 79). Aufgrund dieses Magnetfeldes werden Wirbelströme in den Leiter induziert, welche die Verluste verursachen. Die Stärke des Verlustes ist "[...] von der Anzahl und Position der Nachbarwindungen, von dem Strom durch diese Windung, ob sie zur Primär- oder Sekundärwicklung gehören, sowie von dem Fluss durch den Kernquerschnitt und von der Kerngeometrie und den Luftspalten [abhängig]" ([1], S. 79). Mit zunehmender Frequenz vergrößern sich die Verluste material- und geometrieabhängig (siehe Abbildung 13, P_{prox}). In Abbildung 13 sind alle Verlustmechanismen an Abhängigkeit der Frequenz dargestellt und wie sie zum Gesamtverlust beitragen.



Abbildung 13: Frequenzabhängigkeit der verschiedenen Verlustmechanismen für eine Beispielanordnung ([1], S. 100); P_{prox} Proximity-Verluste, RMS-Verluste P_{rms} , Skin-Verluste P_{skin} , Gesamtverluste P_{ges}

3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material

Die Beschreibung der Kopplung des induktiven Wirbelstromverfahrens beruht auf der Ausarbeitung von Herrn Clemens, welcher den Zusammenhang mathematisch beschreibt und dazu Simulationen zum Verhalten durchführt [5]. Zunächst folgt eine Erläuterung, wie das induktive Wirbelstromverfahren im konkreten Fall funktioniert. Darauf aufbauend wird auf die Ausarbeitung von Herrn Clemens eingegangen und letztlich die aus der Bedämpfung resultierenden Änderungen der Spulenparameter erläutert. Die Betrachtungen legen zugrunde, dass die Kapazität *C* sich gegenüber der Induktivität *L* um den Faktor 10^{-6} unterscheiden (Kapazität *C* in pF und Induktivität *L* in µH). Die Änderung der Kapazität *C* ist sehr klein, sodass sie unabhängig von der Frequenz und dem Abstand anzunehmen ist ([27], S. 104).


Der im letzten Abschnitt beschriebene Schwingkreis erhält eine permanente Erregung und stellt dabei eine spulenparameterabhängige Resonanzfrequenz ein. Das daraus entstehende veränderliche magnetische Wechselfeld induziert in ein leitfähiges Material Wirbelströme. Diese wiederum erzeugen ein magnetisches Wechselfeld, welches dem erregenden Feld entgegengerichtet ist. Die Stärke des Gegenfeldes ist von dem Abstand zwischen der Spule und der leitfähigen Fläche abhängig. Im Wechselmagnetfeld kommt es zu einer Überlagerung der Felder. Dies hat zur Folge, dass die Selbstinduktivität der Spule sinkt, sich abstandsabhängig die Gesamtimpedanz verkleinert und die Frequenz erhöht. Die Frequenz stellt die Messgröße für den induktiven Wirbelstromsensor dar.

Es folgt nun die Beschreibung der Kopplung zwischen einer Spule und einer leitfähigen Membran. Das in Abbildung 14 aufgestellte Modell, dass die sich bildenden Wirbelströme im leitfähigen Material aufgrund der Wirkung des Wechselmagnetfeldes einer Spulenwindung darstellt, visualisiert die Kopplungsbeziehung. Zur Vereinfachung wird eine Spule mit einer Windung angenommen. Abbildung 14 verdeutlich, dass die entstehenden Wirbelströme eine ringförmige Ausbreitung aufweisen. Als Ausgangspunkt ist das magnetische Vektorpotenzial auf dem leitfähigen Material zu betrachten, welches sich in der Zylinderkoordinatendarstellung in zwei Komponenten aufteilt:

$$\vec{A} = \frac{\mu \cdot i(t)}{4\pi} \int \frac{dl_1}{\left| \overrightarrow{D_{PQ}} \right|} \cdot$$

$$\overrightarrow{A_r} = -\frac{\mu \cdot i(t)}{4\pi} \cdot \int_{0}^{2\pi} \frac{R_t \cdot \sin(\alpha) \, d\alpha}{\sqrt{R_t^2 + r_k^2 - 2R_t r_k \cos(\alpha) + z_t^2}}$$

$$\overrightarrow{A_{\psi}} = \frac{\mu \cdot i(t)}{4\pi} \cdot \int_{0}^{2\pi} \frac{R_t \cdot \cos(\alpha) \, d\alpha}{\sqrt{R_t^2 + r_k^2 - 2R_t r_k \cos(\alpha) + z_t^2}}$$

Formel 8: oben: magnetisches Vektorpotenzial \vec{A} ; mitte: radialer Vektor $\overrightarrow{A_r}$ auf der Fläche (target); unten: Azimuth-Vektor $\overrightarrow{A_{\psi}}$ auf der Fläche (target) **([26], S. 385)** μ : Permeabilität; i(t): zeitabhängiger Strom; dl_1 : infinitesimaler Abstand auf der Windung; $|\overrightarrow{D_{PQ}}|$: Betrag des Weges PQ; R_t : Radius der Windung; r_k : Radius des Ringes; z_t : Abstand z-Achse





Abbildung 14: Schemata zur Veranschaulichung des Wirbelstroms mit dem magnetischen Vektorpotential $\overrightarrow{A_r}$ und $\overrightarrow{A_{\psi}}$ ([26], S. 386)

Da die Sinusfunktion von $\overrightarrow{A_r}$ antisymmetrisch ist, ist das Ergebnis des Integrals von $\overrightarrow{A_r}$ null [5]. Als Schlussfolgerung ist die einzige relevante Komponente der Vektor $\overrightarrow{A_{\psi}}$, wodurch der Strom in der leitfähigen Platte nur im Kreis fließt und sich nicht radial ausbreitet [5]. Die Lösung der Komponenten $\overrightarrow{A_{\psi}}$ ist durch die Umformung der Formel 8 (Azimuth) mithilfe elliptischer Integrale 1. und 2. Art zu erhalten:

$$\overrightarrow{A_{\psi}} = \frac{\mu \cdot i(t)}{\pi k} \cdot \sqrt{\frac{R_t}{r_k}} \cdot \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) \cdot F - E \right]$$

mit $F = \int_0^{2\pi} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)}}$ und $E = \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2(\beta)} \, d\beta$
und mit $\beta = \frac{\alpha - \pi}{2}$ und $k = \sqrt{\frac{4\left(\frac{r_k}{R_t}\right)}{\left(1 + \frac{r_k}{R_t}\right)^2 + \left(\frac{Z_t}{R_t}\right)^2}}$

Formel 9: oben: Azimuth-Vektor $\overrightarrow{A_{\psi}}$ mit elliptischem Integral 1. (F) und 2. (E) Art unter Substituierung von β ([26], S. 386)



Anhand dieses Integrals lässt sich das magnetische Vektorpotenzial an jedem Punkt der leitfähigen Platte mit dem Abstand r_k ermitteln ([26], S. 386).

Demnach liegt es nahe, dass jede einzelne Windung der Spule übertragen auf die Platte als Ringe zu verstehen sind, was dem Modell eines idealen Transformators nachempfunden ist [5]. Jede Spulenwindung beeinflusst jeden Ring in der Platte. Im Umkehrschluss "[kann die] Gegeninduktivität [...] jede[r] einzelne[n] Windung für jeden Ring auf der Platte berechnet werden" [5]:

$$M = \frac{\psi}{I} = \oint \vec{A}(I) \cdot dI$$

Formel 10: Gegeninduktivität M der leitfähigen Platte aus dem magnetischen Fluss ψ in Abhängigkeit des Stroms I; Alternative Beschreibung: Ringintegral des magnetischen Vektorpotenzial \vec{A} in Abhängigkeit des Stroms I [5]

 ψ repräsentiert den magnetischen Fluss eines Ringes auf der Platte und besitzt einen Wirbelstrom *I*, welcher von der abstandsabhängigen Induktionsspannung erzeugt wird. Mit der gewonnenen Kenntnis über das magnetische Vektorpotenzial $\overrightarrow{A_{\psi}}$, aus Formel 10, lässt sich die Gegeninduktivität jedes einzelnen Ringes auf der leitfähigen Platte bestimmen und aufsummieren, welche durch jede einzelne Windung der Spule verursacht wird. Wendet man Formel 9 auf Formel 10 an, erhält man die Gegeninduktivität eines bestimmten Ringes:

$$M = \frac{2\mu_0\mu_e \cdot r_k}{k} \cdot \sqrt{\frac{R_t}{r_k} \cdot \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) \cdot F - E \cdot \right]} \quad mit \quad \mu_e = 2 \cdot \frac{\mu_r}{1 + \mu_r}$$

Formel 11: Gegeninduktivität M unter Berücksichtigung des magnetischen Vektorpotenzials $\overrightarrow{A_{\psi}}$ ([26], S. 390)

Die Summe aller Gegeninduktivitäten bildet die Gesamtgegeninduktivität. Die Simulationsergebnisse von Herrn Clemens zeigen auf, dass die Anzahl der Windungen einen Einfluss auf die Bildung von maximalen magnetischen Vektorpotenzialen hat.



Abbildung 15: magnetisches Vektorpotential als Funktion des normierten Radius; **links**: Erregerspule mit einer Windung; magnetisches Vektorpotenzial parallel zur Windung; **rechts**: Erregerspule mit mehreren Windungen; magnetisches Vektorpotenzial verschiebt sich zur Spulenmitte **[5]**



In Abbildung 15 ist der Abstand der Spule verändert und der Radius normiert, sodass der höchste Wert des magnetischen Vektorpotenzials den Radiuswert in Relation des Spulenradius darstellt. Dieser Wert befindet sich bei einer Windung der Spule ungefähr in der Höhe des Radius der Windung (siehe Abbildung 15 links). Bei mehreren Windungen verschiebt sich das maximale magnetische Vektorpotenzial zur Mitte der Spule (siehe Abbildung 15 rechts; unterhalb des normierten Radius von 1).

Bei der Betrachtung der Gegeninduktivität erkennt man Parallelitäten zu der Magnetfeldstärke des Skineffektes außerhalb eines Leiters aus Abschnitt 3.1.1.1. Die Frequenz der Spule erhöht sich mit abnehmendem Abstand aufgrund der Zunahme der Gegeninduktivität (siehe Abbildung 16). Das Verhalten ist einer -Funktion nachempfunden, sodass die Feldstärke zur Spule bzw. zu den Windungen wächst. Dies kommt zustande, da die induzierte Spannung - und damit die Gegeninduktivität - in der leitfähigen Platte ebenfalls wächst.



Abbildung 16: Zusammenhang der abstandsabhängigen Gegeninduktivität und Frequenz; Resonanzfrequenz der Spule ohne Bedämpfung: 5 MHz; parasitäre Kapazität: ca. 45 pF; Induktivität der Spule: 24 µH [5]

Betrachtet man die Änderungen an der Spule selbst, sind die Zusammenhänge ähnlich beschreibbar. Infolge der Gegeninduktivität sinkt die Selbstinduktivität und erniedrigt die Impedanz *Z* der Spule gemäß Formel 1. Das bedeutet, dass sich die Beträge des Real- und Imaginärteils der Impedanz *Z* entsprechend verkleinern. Durch die Erniedrigung der Selbstinduktivität *L* im Resonanzfall steigt die Frequenz des Schwingkreises antiproportional:

$$L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{res}}\right)^2}{C} \quad ; \quad L \sim (1/f_{res})^2$$

Formel 12: Antiproportionaler Zusammenhang zwischen Selbstinduktivität L und Resonanzfrequenz fres

Aus der Kenntnis der Selbstinduktivität L der Spule ohne Bedämpfung lässt sich die Gegeninduktivität gegenprüfen. In Summe muss die Selbstinduktivität L und die Gegeninduktivität M die ursprüngliche Gesamtinduktivität L_{ges} betragen:



$L_{aes} = L + M$

Formel 13: Rückführung der ursprünglichen Gesamtinduktivität L_{ges} aus der Summe von Induktivität L und Gegeninduktivität M

Des Weiteren ist die Eindringtiefe δ zu beachten, die von der resultierenden Resonanzfrequenz abhängt. Bei gegebener spezifischer Leitfähigkeit \varkappa und Permeabilität μ_r der leitfähigen Platte sinkt die Eindringtiefe δ antiproportional bei steigender Frequenz:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot \varkappa \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad ; \quad \delta \sim \left(\frac{1}{f_{res}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Formel 14: antiproportionaler Zusammenhang zwischen Eindringtiefe δ und Resonanzfrequenz f_{res}

Die Resonanzfrequenz selbst ist wiederum von der Induktivität und der Kapazität gemäß Formel 2 abhängig. Da die verwendete leitfähige Platte ein austenitischer Edelstahl X5CrNi18-10 (V2A) ist, ist es nahezu nicht magnetisierbar und kann als nicht ferromagnetisch angesehen werden [18]. Daher entspricht die Permeabilitätszahl $\mu_r = 1$. Es ist zu erwähnen, dass die Eindringtiefe δ unterhalb der Dicke des verwendeten Edelstahlplatte befinden soll, damit das magnetische Wechselfeld nicht durch diese hindurchscheint. Die Folge wäre, dass ungewollte Gegenstände in die Messung beeinflussen.

3.1.1.3 Empfindlichkeit des induktiven Wirbelstromverfahrens

Für die Betrachtung der Empfindlichkeit sind weitere Überlegungen zu der bereits aufgeführten Kopplungsbeziehung zwischen einer Spule und einem elektrisch leitfähigen Material von Bedeutung. In Abbildung 17 nimmt der Verlauf der Frequenz den Kurvenverlauf einer 1-Funktion an. Die höchste Empfindlichkeit des Messsystems ist an der Stelle mit der größten Steigung:

$$E = \frac{\Delta f}{s}$$

Formel 15: Empfindlichkeit E in Abhängigkeit der Differenz Δf zweier benachbarter Resonanzfrequenzen und dem Abstand s zwischen diesen Resonanzfrequenzen

Voraussetzung für eine nutzbare Empfindlichkeit ist unter anderem auch ein lineares Verhalten gegenüber einer Abstandsänderung. Laut der Simulation von Herrn Clemens befindet sich dieser Bereich zwischen 1 – 2 mm zu den festgelegten Parametern (Abbildung 16) zur Berechnung der Gegeninduktivität und der Resonanzfrequenz. Je kleiner der Abstand eingestellt Bemessungsabstand der Empfindlichkeit







ist, desto größer ist die Frequenzänderung pro 0,1 mm. Die Stärke der Empfindlichkeit ist ebenso von der Resonanzfrequenz der Spule abhängig. Ab einem gewissen Abstand vergrößert sich die Steigung und somit die Empfindlichkeit exponentiell (Abbildung 17). Bei Spulen, welche höhere Resonanzfrequenzen über 10 MHz erzeugen, werden höhere Empfindlichkeiten in Bezug auf den Spulen-Membran-Abstand erreicht. Empirisch lässt sich die stärkste Steigung eines linearen Bereiches bei geringem Abstand feststellen, da dort die größte Empfindlichkeit zu erwartet ist.

3.1.2 Masseeffekt des Niederschlags auf der Membran

Die Messungen bei der Firma Lambrecht meteo GmbH zeigen, dass das auf der Membran liegende Wasser zu einer Verzerrung der absoluten Resonanzfrequenz führt und eine Dämpfung der einzelnen Tropfen verursacht. Da die Ansammlung von Wasser mit einer Massenerhöhung auf der Membran einhergeht, ist die Membran durch den daraus entstehenden Druck belastet. Die bisher nutzbare Fläche auf der Membran beträgt 0,025 m² und hat aufgrund des Dichtungsrings ein maximales Volumen von 0,140 mm³. Bei einer Dichte von ca. 1000 kg/m³ beträgt die Masse des Wassers 140 g, welche auf der Membran zum Liegen kommt. Dies entspricht einer Kraft von

$$F_g = m \cdot g = 140 \cdot 10^{-3} \ kg \cdot 9,81 \ \frac{m}{s^2} = 1,3734 \ N$$

Formel 16: Gewichtskraft F_g einer Wassermasse von m = 140 g

Der Sensor besitzt eine Neigung von 12°, weshalb nicht die gesamte Masse auf der Membran zum Liegen kommt (siehe Abbildung 18). Dies bedeutet, dass die Gewichtskraft F_g nicht

komplett wirkt. Die übrige Masse sammelt sich gemäß dem eingestellten Winkel auf der Membran bis auf die Höhe der Kante Dichtungsringes. des Durch die Oberflächenspannung des Wassers kann sich die Wassermenge dennoch leicht erhöhen. Insgesamt kommt es zu einer Auslenkung der Membran, welche im µm-Bereich zu schätzen ist und auf einer Hemisphäre der Membran auftritt (siehe Abbildung 18). Die Biegung der Membran ist im Randbereich stärker, sodass eine Asymmetrie vorherrscht, welche von der Einspannkraft der Membran abhängt (siehe Abbildung 18). Die Einspannung



Abbildung 18: unten: Frontalansicht mit Wasseransammlung im unteren Membranbereich; oben: Querschnitt durch Membran und Dichtungsring



muss eine Schwingung zulassen können, damit der Sensor Abstandsänderungen durchführt. Eine zu hohe Einspannung führt zu Einschränkungen in der Empfindlichkeit des Sensors, auch wenn in diesem Fall aufliegendes Wasser einen geringeren Einfluss ausübt. Mit dem bisherigen Aufbau der Gehäuseoberseite kann die Problematik nicht gelöst werden. Zusätzlich wirkt das aufliegende Wasser dämpfend für den Aufprall von weiteren Tropfen und minimiert die Abstandsänderung des induktiven Wirbelstromsensors für gleichgroße Tropfen.

3.2 Software

Zur Detektion und Verarbeitung des von der Hardware erzeugten Signales wird das Entwicklungsboard Heltec WiFi Lora 32 V2 verwendet, welches über den Mikrokontroller ESP32 der Firma Espressif verfügt. Im Nachfolgenden wird erläutert, wie Programme auf dem ESP32 ausgeführt werden und welche Konflikte daraus entstehen. Diese Erläuterung dient dem Verständnis für den anschließenden Optimierungsansatz, um das weitere Vorgehen zu begründen.

3.2.1 ESP32-Architektur – Dual-Core

Der verwendete Mikrocontroller ESP32 ist ein Dual-Core-System mit zwei Harvard Architektur Xtensa LX6 CPUs ([7], S. 24). Beide CPUs (Central Processing Unit) besitzen eine symmetrische Adressenzuordnung, was bedeutet, dass sie dieselben Adressen für den Zugriff auf denselben Speicher verwenden (siehe Abbildung 19). Die einzelnen Kerne arbeiten unabhängig voneinander mit einem festgelegten Systemtakt, welcher ohne Anpassungen bei 240 MHz ab Werk eingestellt ist. Einer der beiden Kerne trägt die Bezeichnung "PRO CPU" (Core 0) und ist zuständig für die Bearbeitung von Protokollen [16]. Mit Protokollen



Abbildung 19: Systemarchitektur des ESP32 Dual-Core-Systems mit PRO_CPU und APP_CPU, welche sich die Speicher teilen ([7], S. 25)

sind unter anderem drahtlose Verbindungen wie WiFi, ESP-NOW und Bluetooth gemeint, welche auf Core 0 verarbeitet werden [16]. Der weitere Kern trägt die Bezeichnung "APP_CPU" (Core 1) und verarbeitet jegliche Bestandteile, die als Anwendung programmiert sind [16]. Diese Aufteilung soll garantieren, dass die Prozesse des einen Kerns nicht die des anderen stören. Somit können gleichzeitig mehrere unabhängige Prozesse durchgeführt werden. Zudem können verschieden Aufgaben zu bestimmten Kernen zugeordnet werden. Unter der Programmierumgebung Arduino-IDE ist die Ausführung der Hauptschleife fest dem



Kern "APP_CPU" zugeordnet [16]. Die Hauptschleife und das Protokoll können nicht auf andere Kerne übertragen werden.

3.2.2 Impulszähler (PCNT)

Zur Ermittlung der Resonanzfrequenz des Schwingkreises wird der interne Impulszähler (PCNT) verwendet, welcher ein vorzeichenbehafteten 16-Bit Zählregister darstellt ([7], S. 488). Während eines definierten Zeitraumes zählt der Impulszähler steigende und fallende Flanken eines Eingangssignals. Der ESP32 verfügt über acht Impulszählereinheiten mit je zwei Kanälen, welche einzeln konfigurierbar sind ([7], S. 488). Zur Konfiguration des Impulszählers gehören nachfolgende Parameter:

- Auswahl der PCNT-Einheit und -Kanal (PCNT-Unit und -Channel)
- Definition des GPIO (General Purpose Input/Output) für das Eingangssignal
- Definition des GPIO für das Kontrollsignal
- Setzen einer maximalen Anzahl von Impulszählungen (zum Auslösen eines Interrupts)
- Zählverhalten (Zähler in- und/oder dekrementieren lassen)
- Zählauslöser (fallende und/oder steigende Flanke des Eingangssignals)
- Freigabe des Zählers anhand des Pegels des Kontrollsignals
- Zuordnung der Impulszählereinheit (Unit) zum Aktivieren, Pausieren und Fortsetzen des PCNT
- Freigabe und Zuordnung der Impulszähleinheit (Unit) zum Ausführen von Interrupts



Abbildung 20: Impulszähler (PCNT) Architektur ([7], S. 488)



Abbildung Aufbau Impulszählers. Neben 20 den den zeigt des genannten Konfigurationsparametern sind Filter und weitere Limits einstellbar, um Events auszulösen und Interrupts auszuführen. Bisher ist der PCNT so konfiguriert, dass er fallende und steigende Flanken eines Eingangssignals detektiert und den Zählerwert inkrementiert. Solange der maximale Wert (Limit) nicht erreicht ist, wird der aktuelle Zählerwert gespeichert. Ist das Limit erreicht, setzt ein Interrupt den Zählerwert auf null ([7], S. 488). Der Impulszähler ist von den Kernen entkoppelt und wird über die Software angesprochen und ausgelesen ([7], S. 488). Der PCNT verwendet den ABP_CLK-Takt der CPU, welcher maximal 80 MHz beträgt und von dem CPU CLK-Takt abhängt (Abbildung 21; [7], S. 488). WiFi als auch die Peripherie – damit auch der Impulszähler – arbeiten mit der Taktfrequenz des APB CLK-Taktes.



Abbildung 21: System-Clock-Aufstellung für WiFi und Peripherie (Peri) ([7], S. 40)

3.2.3 Programmablauf

Der grundlegende Programmbaustein, welcher aus dem Zählen der Pulse über den PCNT und dem Senden der Daten via ESP-NOW bestehen, finden weiterhin Anwendung, wie es in Abschnitt 2.3 Softwarekomponenten dargestellt ist. Angesichts der erkannten Probleme aus den Messungen in der Firma Lambrecht meteo GmbH sind die Abläufe der Software zu analysieren und anzupassen. Aus dem vorherigen Abschnitt ist deutlich geworden, dass die Ausführung des Sendeverfahrens und der Anwendung auf unterschiedlichen Kernen stattfindet. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.4.3 Schlussfolgerung der Messungen und Problemstellung wird deutlich, dass das Erscheinen von Peaks mit der Kommunikation zwischen den Kernen und/oder dem Zugriff auf die Daten bei gleichzeitigem Speichern zusammenhängt. Die einzelnen ausgeführten Aufgaben wissen gegenseitig nicht über ihre Existenz und arbeiten ihr jeweiliges Programm ab. Zur Verdeutlichung des Erscheinungsbildes des Signals mit und ohne Sendeverfahren wir im nächsten Abschnitt ein Vergleich angefertigt.



3.2.4 ESP-NOW Vergleichsmessung

Zur Darstellung der Erkenntnisse der Bachelorthesis von Herrn Bödder in Bezug auf die Peak-Erzeugung durch die Software bzw. der Architektur des ESP32-Mikrocontrollers, sind zwei Vergleichsmessungen angefertigt worden. Diese sollen hervorheben, wie sich die Ab- und Anwesenheit von Sendeverfahren einem auf die berechnete Frequenz auswirkt. Dazu erzeugt ein Frequenzgenerator ein Rechtecksignal mit einer Frequenz von 1,36 MHz und einem Peak-to-Peak Wert von $V_{PP} = 2,3$ V, was im Wesentlichen den Parametern der Spule α aus dem Teststand der Firma Lambrecht im unbedämpften Zustand entsprechen. Bei Messungen des Programmes ohne Sendeverfahren ist eine konstante Schwankung der Werte um 100 Ηz aufgetreten (Abbildung 23). Während der Messung sind keine weiteren Effekte



Abbildung 22: Frequenzmessung mit Sendeverfahren mit einem Frequenzgenerator mit der Frequenz von 1,36 MHz (Messung 1-Feb-2022 14.19.33)



Abbildung 23: Frequenzmessung ohne Sendeverfahren mit einem Frequenzgenerator und einer Frequenz von 1,36 MHz (Messung 1-Feb-2022 13.59.08)

aufgekommen. Das Messergebnis des Programmes mit Sendeverfahren zeigt sehr hohe Peaks von maximal 16,9 kHz auf (Abbildung 22). Außerdem weisen die Peaks ein periodisches Verhalten mit einer ungefähren Frequenz von 3,1 Hz auf (Abbildung 64 Anhang; Berechnung Anhang [D]). In diesem Szenario hat sich die Frequenz des periodischen Auftretens der Peaks bei einem anderen Wert eingestellt als bei der Messung bei der Firma Lambrecht. Dieser Wert variiert bei jedem Neustart des Mikrocontrollers und lässt sich nicht vorhersagen. Die Tatsache Phänomens dieses führt zum nächsten Abschnitt. indem Theorien und Behebungsmaßnahmen zur Verhinderung vorgestellt werden.

3.2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Peak-Erzeugung

Für das Auftreten von fälschlichen Werten in Form von Peaks kann die sogenannte Race Condition verantwortlich sein. Diese tritt ein, wenn Lese- und Schreibbefehle nahezu gleichzeitig ausgeführt werden [21]. Aus diesem Grunde können veraltete oder gänzlich



falsche Daten auftreten. Aufgrund der Arbeitsaufteilung der einzelnen Kerne des ESP32-Mikrocontrollers, ist ebenso ein unzureichend synchronisierter Ablauf dafür verantwortlich, da beide Kernen ihre Aufgaben unabhängig voneinander verarbeiten und sich gegenseitig beeinflussen können.

Angesichts des bisherigen Programmablaufes sind beide Ansätze denkbar. Zum Schutz der Ressourcen, welche gleichzeitig verwendet werden, sind mehrere Mechanismen vorhanden.

Ein einfaches Prinzip ist die Erstellung eines Doubleoder Ring-Buffers. Ein Double-Buffer lagert einen Wert doppelt ab, sodass beim Abruf der Daten nicht gleichzeitig auf derselben Adresse geschrieben und gelesen wird [28]. Ein <u>Ring-Buffer</u> verwendet ein Array mit definierter Länge, bei welchem Daten nach der Reihe eingelesen und gespeichert werden [32]. Ist das Array gefüllt, findet der Löschvorgang des zuerst gespeicherten Wertes statt und alle weiteren Daten rücken auf (siehe Abbildung 24). Hier ist das Lesen und Schreiben von Daten ebenfalls voneinander getrennt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der gleichzeitige Zugriff durch Größe die des Arrays nahezu ausgeschlossen ist.

Eine weitere Möglichkeit ist das Erstellen von Semaphoren. Die Semaphore haben den Zweck, die Nutzung von einer Ressource nur für eine bestimmte Anzahl von Aufgaben zu reservieren und freizugeben [31]. Es wird erfasst, ob und wie oft eine Ressource verwendet wird. Somit wird gewährleistet, dass keine weiteren Aufgaben Zugriff auf die Ressourcen erhalten (siehe Abbildung 25). "Semaphore [dürfen] von anderen Aktivitätsträger freigegeben werden [...]" [31]. Ein Mutex dient zum gegenseitigen Ausschluss von Zugriffsrechten [30]. Dazu wird ein Kontrollelement eingeführt, welches signalisiert, dass auf die Ressource zugegriffen werden möchte [30]. Weitere Prozesse befinden sich dadurch in einem Warte-Status, "wenn [...] [andere] auf diese Daten [zugreifen]" [30]. Somit kann nur eine Aufgabe auf die Ressource zugreifen.



Abbildung 24: Schematischer Aufbau eines Ring-Buffers



Abbildung 25: Schematischer Ablauf des Semaphore-Verfahrens



Die letzten beiden Verfahren beruhen darauf, dass der ESP32-Mikrocontroller das Echtzeitsystem FreeRTOS (RTOS: Real Time Operationg System) verwendet [29]. Dies ist ein Miniatur-Betriebssystem, um einzelne Aufgaben auf unterschiedlichen Kernen auszuführen, zuzuordnen und zu organisieren [29]. Diese Aufgaben (Tasks) können zusätzlich mit einer Priorität besitzen, um eine Hierarchie herzustellen.

Für eine genaue Verwendung der Abtastrate von 10 ms bietet der ESP32-Mikrocontroller vier Hardware-Timer. Diese sind 64-Bit-Timer, welche auf 16-Bit-Prescalern und 64-Bit-Aufwärts-/ Abwärtszählern basieren ([7], S. 497). Im Gegensatz zum Software-Timer sind Hardware-Timer deutlich präziser, da sie den 80 MHz APB_CLK verwenden. Zur zeitlich korrekten Ausführung von Befehlen ist ein Hardware-Timer zu bevorzugen.

Zuletzt ist eine Umgehung des gleichzeitigen Lese- und Schreibezugriffs durch gezieltes Einsetzen von Interrupts möglich. Ein Interrupt unterbricht alle Prozesse der Kerne, um ausschließlich den Inhalt des Interrupts auszuführen. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die auszuführende Aufgabe des Interrupts möglichst kurz sein muss, da diese selbst nicht unterbunden werden kann.



4. Optimierungsansatz und Priorität

Dieser Abschnitt legt fest, auf welche Problemstellungen zur Optimierung der Fokus liegt, um eine eindeutige Zielausrichtung vorzugeben. Außerdem wird eine Priorisierung der Optimierungspunkte aufgestellt. Die Anpassungen und Optimierungen sollen zur Generierung verlässlicher Messsignale beitragen, welche wichtige Daten für das Forschungsprojekt-KIWaSuS liefern.

4.1 Programmablaufoptimierung – Peak-Unterdrückung

Die Verfälschung des Messsignals in Form von unerwünschten Peaks aufgrund der Software und/oder der Architektur des ESP32-Mikrocontrollers sind Verhaltensweisen, welche die Aussagekraft mindert und die Nachbearbeitung der Daten erschwert. Unter anderem beeinflusst dies die Empfindlichkeitsanalyse, da die entstehenden Peaks bei Verwendung von ESP-NOW das Messsignal überlagern. An dieser Stelle ist es notwendig, die Einflüsse der Peaks zu eliminieren, um eine störungsfreie Empfindlichkeitseinstellung durchzuführen und ein unverfälschtestes Messsignal herzustellen. Dies ist die Grundvoraussetzung des Systems, die gewährleistet werden soll. Eine Untersuchung innerhalb des Programmes wird angefertigt, um die Ursache zu ermitteln und/oder einzugrenzen. Dazu wird folgende These im Zusammenhang mit der Software aufgestellt:

1. Die entstehenden Peaks werden softwareseitig verursacht und können durch eine Programmoptimierung entfernt werden.

4.2 Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration

Für ein aussagekräftiges Messergebnis ist eine eindeutige und stabile Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration relevant. Dazu werden folgende Thesen aufgestellt:

- 1. Je höher die parasitäre Parallelkapazität der Spule ist, desto unempfindlicher verhält sich der Sensor gegenüber äußeren Einflüssen aufgrund höherer Güte.
- 2. Je höher die Differenz der Frequenz vom unbedämpften Zustand ist, desto höher ist die resultierende Empfindlichkeit des Sensors.

Damit steht die Konfiguration der Spule zur Stabilisierung des Messsignals mithilfe der Kapazitätsanpassung und die Ermittlung eines geeigneten Abstandes zwischen Spule und Membran im Fokus. Im nachfolgenden Abschnitt 5 wird die Vorgehensweise diesbezüglich erläutert. Die Wahl zur Priorisierung ist damit begründet, dass mit einer eindeutigen und stabilen Konfiguration mit nachvollziehbaren Parametern Fehlerquellen minimiert und lokalisiert werden können, welche bei einer Softwarebearbeitung nicht weiter berücksichtigt



werden müssen. Letztlich ist die Empfindlichkeitskonfiguration essenziel für die Qualität des Messergebnisses.

4.3 Masseneffektminimierung

Da die Masse aufliegendem Wasser auf der Membran Einfluss auf das Verhalten des induktiven Wirbelstromsensors ausübt, ist es das Ziel, diesen Einfluss zu reduzieren. Dazu fordert der Optimierungsansatz die Erhöhung des Abflusses und die Minimierung des Aufstaus von Wasser auf der Membran. Diese Maßnahmen werden in Gänze berücksichtigt, erhalten dennoch eine geringere Priorität als die zuvor genannten Optimierungsansätze. Grund dafür ist, dass die vorherigen Optimierungsansätze deutlich stärkere Einflüsse auf das Grundverhalten des induktiven Wirbelstromsensors verursachen. Folgende Thesen werden in diesem Zusammenhang aufgestellt:

- 1. Der Wegfall des Dichtungsringes führt zu einer geringen massenabhängigen Änderung der Resonanzfrequenz.
- 2. Eine erhöhte Neigung von 25° des Sensorgehäuses fördert den Abfluss des Wassers und führt zu einer geringen Resonanzfrequenzänderung.



5. Konkretisierung der Optimierungsansätze

Dieser Abschnitt konkretisiert die Maßnahmen zur Optimierung der im letzten Abschnitt genannten Optimierungsansätze auf der Hard- und Softwareebene. Es stehen zum Teil mehrere Lösungsansätze zur Verfügung, welche zur Optimierung angewendet werden. Es sind Maßnahmen dargestellt, dessen Ergebnisse und Diskussionen in den anschließenden Abschnitten folgen.

5.1 Software

Die Anpassung und Optimierung der Software beruht auf den Kenntnissen des Mikrocontrollers und den Ergebnissen zur potenziellen Ursache der Peak-Entstehung aus den Ausarbeitungen von Herrn Bödder [3]. Die Hauptursache der regelmäßig entstehenden Peaks liegt auf der Software- bzw. Architekturebene des Mikrokontrollers ESP32. Um die Problematik der geteilten Ressource zu lösen, werden mehrere Ansätze in Betracht gezogen.

5.1.1 Hardware-Timer

Zur zeitlich korrekten Ausführung von Befehlen wird der Hardware-Timer statt eines Software-Timer implementiert. Diese Anpassung wird grundsätzlich vorgenommen, da ein Hardware-Timer präziser ist (siehe 3.2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Peak-Erzeugung). Dieser Timer löst alle 10 ms ein Interrupt aus, um den aktuellen Zählerwert des PCNT auszulesen, den PCNT anzuhalten und die Berechnung der Frequenz anzustoßen:

```
static void IRAM_ATTR read_PCNT ()
{
    portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux); // disabling the in
    gpio_set_level(OUTPUT_CONTROL_GPIO, 0); // Stop counter -
    pcnt_get_counter_value(PCNT_COUNT_UNIT, &pulses); // Read Pulse Co
    flag = true; // Change flag to
    portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux); // enabling the ir
}
```

// disabling the interrupts
// Stop counter - output control LOW
// Read Pulse Counter value
// Change flag to frequency calculation
// enabling the interrupts

Um die Anwendung mit der Interrupt-Service-Routine (ISR) zu synchronisieren, wird die Variable *portMUX_TYPE* deklariert, da die gezählten Pulse des PCNT gemeinsam bei der Frequenzberechnung verwendet wird:

```
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED; // portMUX_TYPE to do synchronism
```

Die Initialisierung des Timers findet im Setup des Programmes statt. Dort ist festgelegt, welcher Timer (Timer 0) und Prescaler (80) verwendet wird und dass der Timer aufwärts zählt (true):

timer = timerBegin(0,80,true);



Zum Auslösen des Interrupts read_PCNT ist eine Verknüpfung mit dem Timer nötig:

timerAttachInterrupt(timer, &read_PCNT, true); // Interrupt setup (handle, pointer on ISR, edge typ)

Letztlich wird die Abtastrate von 10 ms (*sample_time* = 10000 [10 ms]) zum Auslösen des Timers festgelegt und ein ständiger Neustart initialisiert (true):

timerAlarmWrite(timer, sample_time, true); // specify the counter value generating timer interrupt

Diese Anpassung testet, ob der Hardware-Timer – aufgrund der besseren Genauigkeit – die Peaks bei Verwendung des Sendeverfahrens ESP-NOW eliminiert. Dies wird überprüft, indem das Programm mit und ohne Sendeverfahren grafisch über MATLAB/Arduino dargestellt wird. Unabhängig von dem Ergebnis dieses Tests bleibt der Hardware-Timer für die weiteren Ausführungen implementiert. Das gesamte Programm ist dem Zusatzanhang (D) zu entnehmen.

5.1.2 Double-Buffer / Ring-Buffer

Im Wesentlichen besteht die Implementierung eines Double- oder Ring-Buffers darin, Speicher- und Leseort voneinander zu trennen. Im Falle des Double-Buffers ist die Trennung durch die Variablen *current_* und *next_* realisiert. Die innerhalb einer Iteration gemessene und berechnete Frequenz ist in der Variable *next_* gespeichert. Die für das Sendeverfahren genutzte Variable hingegen lautet *current_*. Nach einer Übertragung der Frequenz via ESP-NOW tauschen die beiden Variablen mit der Funktion *swap* ihre Werte, sodass in der nächsten Iteration die Frequenz aus der letzten Iteration übertragen wird (gespeichert in der Variable *current_*). Somit sind neue Daten ausschließlich in der Variable *next_* und die zu übertragenen Daten in der Variable *current_* gespeichert. Restliche Bestandteile des Programmes bleiben unangetastet.

Die Implementierung des Ring-Buffers beruht auf derselben Grundlage mit dem Unterschied, dass nun ein Array mit fünf Speicheradressen verwendet wird:

```
CircularBuffer<uint32_t,5> wert;
```

// set data typ and nummer of array for buffer

Dabei verhält sich der Ring-Buffer wie ein Schieberegister, welcher kontinuierlich neue Werte über die Funktion *wert.push()* einschiebt:

wert.push(frequency); myData.freq=wert[0]; // save MSB of buffer
// read LSB of buffer

Im Most-Significant-Bit (MSB) ist die in der Iteration berechnete Frequenz und im Least-Significant-Bit (LSB) der Wert des Arrays *wert[0]* zum Senden gespeichert. Der Wert des Arrays *wert[0]* ist ausschließlich für die Übertragung vorgesehen. Restliche Bestandteile des Programmes bleiben unangetastet.



Beide Buffer-Varianten werden auf das Erscheinen der Peaks untersucht. Dazu wird ein Vergleich zwischen den Programmen mit und ohne Sendeverfahren vorgenommen. Die Gesamtprogramme des Double- und Ring-Buffers sind dem Zusatzanhang (E) zu entnehmen.

5.1.3 Semaphore / Mutex

Aufgrund der Erklärung von Semaphoren (3.2.5 Race Condition und Synchronisation der Kerne – Peak-Erzeugung) wird von der Nutzung abgesehen. Grund dafür ist, dass nicht mehreren Aufgaben gleichzeitig Zugriffsrechte zu einer Ressource erhalten sollen. Daher richtet sich der Fokus auf das Mutex-Verfahren, da dieser den Zugriff gegenüber anderen Prozessen sperrt. Um ein Mutex zu erstellen, wird bei eingebundenen Bibliotheken *FreeRTOS.h* und *semphr.h* ein Handel (*TaskHandle_t sending_handle = NULL*) und ein zugehöriger Platzhalter für den Zugriff (*static SemaphoreHandle_t mutex*) erstellt. Die Initialisierung und Parametrisierung des Mutexes finden im Setup des Programmes statt:

```
mutex = xSemaphoreCreateMutex();
                                                             // if Mutex is created
 if (mutex != NULL) {
  Serial.println("Mutex created");
}
xTaskCreatePinnedToCore(
                                                    // Task function.
           sending,
           "Sending",
                                                    // String with name of task.
           1000,
                                                    // Stack size in bytes.
                                                    // Parameter passed as input of the task
           NULL,
                                                    // Priority of the task.
           1,
           &sending handle,
                                                    // Task handle.
           1);
                                                    // Core for Task
```

Mit dem Befehl *xTaskCreatePinnedToCore* wird der Name der Aufgabe (*sending*), ein String (*Sending*), die Cachegröße in Bytes (*1000*), die Priorität der Aufgabe (*1*), die Zuordnung zu einem Handle (*sending_handle*) und die Zugehörigkeit zu einem Kern (*1*) festgelegt.

Die auszuführende Aufgabe ist in der Funktion sending bestimmt:

```
void sending(void* parameter)
{ while(1) {
    if (xSemaphoreTake(mutex,portMAX_DELAY) == pdTRUE){
      // Send message via ESP-NOW
      esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
      xSemaphoreGive(mutex);
      vTaskDelay(10 / portTICK_PERIOD_MS);
    }}
```

Mit einer Endlosschleife (*while(1)*) kontrolliert die Funktion, ob ein Zugriff durch den Mutex-Token vorhanden ist (*mutex*). Auf unbestimmte Zeit (*portMAX_DELAY*) wartet diese auf die Freigabe, ob ein Mutex von einer Aufgabe verwendet werden möchte. Ist dies der Fall, wird die Bedingung der if-Schleife wahr (*pdTRUE*) und das Senden der Daten via ESP-NOW wird



ausgelöst. Die Rückgabe des Mutex-Tokens über *xSemaphoreGive* ist notwendig, damit die Aufgabe wieder freigegeben werden kann. Anschließend wird die Aufgabe für 10 ms angehalten (*vTaskDelay*), damit sie im Anschluss nicht sofort wieder verwendet wird, bevor die Frequenz berechnet wurde. Mit dieser Methode wird das Programm mit und ohne Sendeverfahren verglichen und anschließend bewertet. Das gesamte Programm ist dem Zusatzanhang (F) zu entnehmen.

5.1.4 Interrupt

Mithilfe von einzelnen pegelgesteuerten Interrupts wird die Berechnung und das Senden der Frequenz nacheinander ausgeführt (Abbildung 26). Nach Ablauf des Hardware-Timers wird zunächst die Interrupt-Routine zum Stoppen des PCNT und zum Auslesen der zuletzt gezählten Pulse ausgeführt (*read_PCNT*). Innerhalb dieser Routine wird der Pin GPIO 17 auf den Pegel *high* gesetzt. Dies führt zur Ausführung des Interrupts zur Berechnung der Frequenz, in der zusätzlich die Pegel von Pin GPIO 17 auf *low* und von Pin GPIO 23 auf *high* gesetzt werden. Letzterer Pegel stößt die Interrupt-Routine zum Senden der berechneten Frequenz an. In dieser letzten Interrupt-Routine wird neben dem Senden der Frequenz der Pegel



Abbildung 26: schematischer Ablauf des Programmes mithilfe pegelgesteuerter Interrupts

von Pin GPIO 23 auf *low* und der Pin zum Starten des PCNT auf *high* gesetzt. Sobald der Timer 10 ms erreicht hat, wiederholt sich dieser Vorgang. Das gesamte Programm ist dem Zusatzanhang (G) zu entnehmen.

5.1.5 Verhalten des PCNT (Impulszähler) während des Sendebetriebs

Zur Überprüfung der korrekten Ausführung des PCNT, werden die Zeiten ermittelt, welche das Programm mit und ohne Sendeverfahren braucht, um das erstellte Programm auszuführen. Dazu wird verglichen, ob die Zeit von 10 ms eingehalten wird, welche Zeit bis zum Overflow (Überlauf) und bis zum Stoppen des PCNT benötigt wird, wie viele Overflows stattfinden und wie viele Pulse zuletzt eingelesen wurden. Dies dient zusätzlich als Bestätigung der Annahme von Herrn Bödder, dass die entstehenden Peaks durch die Software und/oder der Architektur des ESP32-Mikrocontrollers verursacht werden. Zu diesem Zweck wird dasselbe Programm verwendet, in dem das Auslösen des Sendevorgangs an- und abgeschaltet wird. Das dafür verwendete Programm ist dem Zusatzanhang (H) zu entnehmen.



5.1.6 Hardwaretrennung von Sende- und Messverfahren

Mit der Trennung von Sende- und Messverfahren auf zwei ESP32 Mikrocontrollern soll der Konflikt der Dual-Core-Architektur behoben werden. Dazu überträgt der Mikrocontroller, welcher die Messung der Frequenz durchführt, über die serielle Schnittstelle UART (Universal Asynchronous Reciever / Transmitter) die berechneten Frequenzen an einen zweiten Mikrocontroller. Anschließend sendet dieser die empfangenen Daten via ESP-NOW. Der erste Mikrocontroller übergibt die Daten über die Schnittstelle UART 0 (GPIO RX und TX). Der zweite Mikrokontroller empfängt die Daten über eine weitere serielle UART-Schnittstelle UART 2 (GPIO 16 [RX2] und 17 [TX2]), welche konfiguriert und initialisiert werden muss. Dazu wird Programmes des zweiten **Mikrocontrollers** die im Setup des Bautrate, die Parametereinstellungen und die verwendeten Pins des Serial-Port-2 initialisiert:

Serial2.begin (115200, SERIAL_8N1, RXD2, TXD2); // Bautrate, 8N1 (8 Bits, kein Paritätsbit, 1 Stoppbit), Pin

Über eine while-Schleife wird die Verfügbarkeit von Daten des Serial-Ports-2 überprüft. Innerhalb der while-Schleife wird mit dem Befehl *parseInt* die erhaltenen Daten in das Format Integer (*int*) übersetzt und in einer Variablen zum Senden gespeichert (*myData.freq*):

myData.freq = Serial2.parseInt();

// Übersetzung in das Format Integer und Speicherung

Anschließend wird der gespeicherte Wert von *myData.freq* via ESP-NOW übertragen. Zur Verknüpfung werden die Mikrocontroller überkreuzt konnektiert, d.h. RX wird mit TX2 und TX mit RX2 verbunden (Abbildung 27). Die verwendeten Programme sind dem Zusatzanhang (I) zu entnehmen.



Abbildung 27: Schematische Darstellung der Verdrahtung zweier Mikrocontroller über die serielle Schnittstelle UART



5.2 Hardware

Auf der Hardwareebene sind drei Hauptfelder zu betrachten: Spulenkonfiguration, Empfindlichkeitsbestimmung und Wasserablaufoptimierung. Letzterem wird insgesamt – wie in Abschnitt 4. begründet – eine geringere Priorität zugeteilt.

5.2.1 Anpassung des Sensorgehäuses zur Wasserablaufoptimierung

Zur Optimierung des Wasserablaufes sind zwei Anpassungen vorgesehen. Der Sensorhalter besitzt eine Neigung von 25°, welche um 13° erhöht wird (Abbildung 28). Die Berechnungen zur veränderten Kraftwirkung eines Tropfens bei 25°-Neigung ergibt, dass 10,3 % Kraftunterschied beim Aufprall senkrecht zur Spule entsteht (Formel 17).



Abbildung 28: Kraftaufteilung an einer schiefen Ebene mit einer 25° Neigung

 $F_{\perp} = F_G \cdot \cos(\alpha) = 2,943 \cdot 10^{-4} N \cdot \cos(25^\circ)$

$$= 2,667 \cdot 10^{-4} N$$

$$\frac{F}{F_{\perp}} = \frac{0,0002943 \, N}{0,0002667 \, N} = 1,103$$

Formel 17: Berechnung der Kraftwirkung eines Regentropfens mit der Masse m = 0,03 g auf eine 25° geneigte Oberfläche; F_G : Gewichtskraft; F_{\perp} : Normalenkomponente der Gewichtskraft; F_E : Hangantriebskraft; $F_G = 3 \cdot 10^{-4} kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 2,943 \cdot 10^{-4} N$

Sämtliche Maße der Sensorhalterung sind unverändert (Anhang [A]). Der angeschraubte Dichtungsring ist durch eine randlose Edelstahlmembran ersetzt, welche mithilfe eines Schraubschellenrings eingespannt ist (Abbildung 29). Für die Dichtigkeit des Gehäuses ist eine Schaumstoffdichtung zwischen der Membran und dem Schraubschellenring eingelassen. Der Boden mit der arretierten Elektronik bildet mit dem restlichen Gehäuse eine Einheit. Somit



Abbildung 29: **links:** Eingespannte Membran über den Schraubschellenring; **rechts:** Halterung mit 25°-Neigung für erhöhtem Wasserabfluss



ist nur eine Dichtigkeit von der Oberseite des Gehäuses zu berücksichtigen. Durch die Einspannung der leitfähigen Edelstahlmembran entsteht eine hohe Spannung, was zu einer leichten Wölbung der Membran nach außen führt (Abbildung 29).

Für eine genaue Ausrichtung des Abstandes der Spule zur Membran dient eine Spulenhalterung innerhalb des Gehäuses, welche mithilfe von M2-Muttern und M2-Unterlegscheiben in 1,5 bzw. 0,35 mm-Schritten eingestellt werden kann (Abbildung 30 oben). Der Abstand ist anhand der Messergebnisse der aus Empfindlichkeitsbestimmung des Systems und der Position der leitfähigen Edelstahlmembran einzustellen. Ein weiterer Vorteil dieser Spulenhalterung ist die stabile Ausrichtung der Spule mit festem Sitz. Die



Abbildung 30: **oben:** seitliche Ansicht der Spulenhalterung mit Abstandseinstellung; **unten:** Gesamtansicht des eingesetzten Spulenhalters im Gehäuse

gesamte Spulenhalterung ist zusammen mit der Spule separat bei geöffnetem Sensor entnehmbar (Abbildung 30 unten). Anhand dieser Anpassungen wird ermittelt, ob die Masseneffekte des Wassers weiterhin einen Effekt auf die Messgröße ausüben. Zum Vergleich wird der bisherige genutzte Dichtungsring bei gleicher Abstandseinstellung und Spulenkonfiguration verwendet. Zur Messung sind die Abstände mit 2 mm und 4 mm und die Neigungen mit 12° und 25° eingestellt. Die Menge an Wasser beträgt 2 ml pro Testdurchlauf und wird mit einer Spritze tropfenweise auf die Membran aufgetragen. Das Testszenario beinhaltet acht Messungen, bei denen die Frequenzerhöhung durch die Masse des aufliegenden Wassers und der maximale Ausschlag pro Tropfen verglichen werden. Zur Veranschaulichung folgt eine Aufstellung der Testdurchläufe (Tabelle 2).

2 mm Abstand		4 mm Abstand		
25°-Neigung ohne	12°-Neigung ohne	25°-Neigung ohne	12°-Neigung ohne	
Dichtungsring	Dichtungsring	Dichtungsring	Dichtungsring	
25°-Neigung mit	12°-Neigung mit	25° Neigung mit	12°-Neigung mit	
Dichtungsring	Dichtungsring	Dichtungsring	Dichtungsring	

Tabelle 2: Testmatrix zur Veranschaulichung der Testkombinationen zur Ermittlung der Wirkung des Masseneffektes auf der Membran



5.2.2 Einstellung der Spulenkonfiguration

Aufbauend auf die theoretischen Grundlagen der Abschnitte 3.1.1.1 Eigenschaften des Parallelschwingkreises in Zusammenhang mit der Spule und 3.1.1.2 Kopplungsbeziehung zwischen Spule und elektrisch leitfähigem Material folgen die Anpassungen der Spulen. Die dafür genutzten Transmitter-Ladespulen für den Qi-Standard sind von der Firma WE (Würth Elektronik GmbH Co. KG), welche für drahtlose Energieübertragungsprozesse verwendet werden. Hintergrund der Wahl dieser Spulen sind [36]:

- 1. gleichbleibende Fertigungsqualität (Massenproduktionsware)
- 2. handliche Größendimension der Transmitter-Ladespulen
- 3. einfache Verarbeitung in das Sensorsystem
- 4. Nutzung eines Ferrit-Schalenkerns zur Minimierung von Streufeldern



Abbildung 31: von links nach rechts: Spule α (WE 760308110), Spule γ (WE 760308111) und Spule η (WE 760308101302) [36]

Die Anpassungen werden an zwei unterschiedlichen Spulen durchgeführt, wobei Spule α als Referenz dient [36]:

- 1. Spule α [33]: 24 μH Induktivität mit Ferritkern (Einzeldrahtwicklung; zwei Layer)
 - a. Resonanzfrequenz (laut Hersteller): 5 MHz
- 2. Spule γ [34]: 6,3 μH Induktivität mit Ferritkern (Doppeldrahtwicklung; zwei Layer)
 - a. Resonanzfrequenz (laut Hersteller): 11 MHz
- 3. Spule η [35]: 5,3 μH Induktivität mit Ferritkern (Einzeldrahtwicklung; ein Layer)
 - a. Resonanzfrequenz (laut Hersteller): 27 MHz

Die Spule α dient als Vergleichskomponente, um die Anpassungen zu vergleichen und eine Aussage über die Verbesserung treffen zu können. Durch Anpassung der Kapazität *C* wird der kapazitive Anteil der Spule verändert. Eine Erhöhung der Kapazität bei gleichbleibender Induktivität *L* erhöht insgesamt die Güte, sodass äußere Einflüsse weniger Einfluss auf das Verhalten des Schwingkreises verursachen. Für die Berechnung der Güte ist die Messung der



jeweiligen Spule im unbedämpften

Zustand mithilfe des Impedanzanalysators (Details dazu im Abschnitt 5.2.3) notwendig, um den Wirkwiderstand R_p im Resonanzfall festzustellen. Als Ausgangspunkt wird die

parasitäre Kapazität der einzelnen



Abbildung 32: Schematische Darstellung der Abstandseinstellung der Spulen

Spulen ohne Anpassung ermittelt (Formel 12), um davon ausgehend die Kapazität zu erhöhen. Dabei ist zu beachten, dass die damit festgesetzte Kapazität größer als die des Grundzustandes ist und die Resonanzfrequenz mit zunehmender Kapazität sinkt (Formel 2). Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Eindringtiefe (Formel 7), welche nicht 0,2 mm überschreiten darf. Die kleinstmögliche Frequenz liegt bei

$$f_{res} = \frac{1}{\pi \cdot (0.2 \ mm)^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot 1 \cdot 1.4 \cdot 10^6 \frac{S}{m}} = 4.523267 \ MHz.$$

Formel 18: Berechnung der erforderlichen Resonanzfrequenz für eine maximale Eindringtiefe von 0,2 mm

Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erzielen, soll mindestens eine Frequenz von <u>10</u> <u>MHz bei einem Bedämpfungsabstand von 4 mm</u> erreicht werden. Die Messung beinhaltet die Beobachtung der Frequenz und der Eindringtiefe ohne und mit Bedämpfung bei den Abständen von 2 mm und 4 mm, um die Verhaltensweisen vergleichen zu können. Die Höhe von Sensorboden bis zur Membran beträgt 58 mm (Abbildung 32). Der Abstand der Spule ist mit der Spulenhalterung wie in Tabelle 3 angegeben eingestellt.

	4 mm Abstand	2 mm Abstand
Spule α	2 Muttern 4 Unterlegscheiben	2 Muttern 10 Unterlegscheiben
Spule γ	3 Muttern	3 Muttern 6 Unterlegscheiben
Spule η	3 Muttern 6 Unterlegscheiben	3 Muttern 12 Unterlegscheiben

Tabelle 3: Verwendete Muttern und Unterlegscheiben zur Höheneinstellung der Spulen für die Abstände 2 und 4 mm

Mit diesen Maßnahmen wird eine geeignete Konfiguration ermittelt und die anschließende Empfindlichkeitsbestimmung des Sensors durchgeführt. Bei jeder Höheneinstellung wird eine Aufnahme des Messsignals für ca. 25 Sekunden mithilfe einer MATLAB-Anwendung (C) angefertigt und gleichzeitig die Frequenz mittels eines Oszilloskops gegengeprüft. Unter



anderem wird begutachtet, wie der Sensor sich verhält, wenn sich in unmittelbarer Nähe ein kapazitiver Einfluss (durch die Anwesenheit einer Hand) befindet.

Auflistung der zu erhebenden Merkmale:

- Ermittlung der Kapazität *C* ohne Anpassung
- Erhöhung der Kapazität zur Erhöhung der Güte (gegen äußere Einflüsse)
- Ermittlung der Frequenzen und Eindringtiefen (unbedämpft, 2 und 4 mm-Abstand zur Membran)
- Ermittlung des Peak-Verhaltens durch äußere Einflüsse

5.2.3 Einstellung der Empfindlichkeit des Messsystems

Zur Ermittlung einer geeigneten Empfindlichkeit und zum Vergleich zwischen den einzelnen Spulenkonfigurationen werden Messungen mit definierten Abständen zwischen den Spulen und der leitfähigen Membran durchgeführt. Zu diesem Zweck wird mithilfe des Präzisions-Impedanzanalysator 4294A der Firma Agilent (Abbildung 33) die Impedanz der Spule anhand der Real- und Imaginäranteile in Abhängigkeit der Frequenz



Abbildung 33: Agilent 4294A Precision Impedance Analyser, 40 Hz bis 110 MHz [14]

gemessen. Über ein Sweep-Signal wird der für die Spule relevante Frequenzbereich zwischen 40 Hz bis zu 110 MHz analysiert. Über eine MATLAB-Anwendung (Zusatzanhang (B)) werden die Daten visualisiert und die Impedanz der Spule über die Berechnung des Betrages dargestellt:

$$Z = \sqrt{|Re|^2 + |Im|^2}$$

Formel 19: Berechnung der Impedanz Z aus den Beträgen des Realteils (Re) und Imaginärteils (Im) der Messungen

Die zugehörige Frequenz zur maximalen Impedanz der Spule stellt die charakteristische Resonanzfrequenz bei einem definierten Abstand dar (Formel 2). Für die Spulen γ und η wird der Abstand zwischen 0 – 6 mm in 0,1 mm-Schritten angepasst und die dazugehörige Resonanzfrequenz festgehalten. Effektiv wird der Bereich zwischen <u>2 mm und 4 mm</u> direkt verglichen, da aus baulichen Gründen Spule η erst ab einem Abstand von 2 mm gemessen werden kann. Dabei wird – wie eingangs angesprochen – die Kapazität der Spule als fester Wert angenommen. Aus den resultierenden Diagrammen wird die Empfindlichkeit pro 0,1 mm untersucht und verglichen, um anschließend eine Bewertung der Empfindlichkeit treffen zu können. Zudem geben die ermittelten Resonanzfrequenzen Aufschluss über die Eindringtiefe (Formel 14), welche für die anschließende Diskussion der Ergebnisse relevant ist. Es handelt



sich um ein austenitischer und nicht magnetisierbarer Edelstahl mit der spezifischen Leitfähigkeit $\varkappa = 1.4 \cdot 10^6 S/m$ und der Permeabilität $\mu_r = 1$ (Abschnitt 3.1.1.2). Über Rückrechnungen wird die Gegeninduktivität (Formel 13) ermittelt, um Assoziationen zu den Resonanzfrequenzen aufzustellen. Die Gegeninduktivität lässt sich näherungsweise anhand der Simulation von Herrn Clemens ebenfalls überprüfen (MATLAB-Anwendung Anhang (J) Gegeninduktivität). Anhand der gesammelten Daten wird ein geeigneter Abstand zwischen Spule und leitfähiger Membran ermittelt.

Auflistung der zu erhebenden Merkmale:

- Darstellung der Resonanzfrequenzen der Spulen in Anhängigkeit des Abstandes
- Änderung der Gegeninduktivität in Abhängigkeit des Abstandes
- Ermittlung eines praktikablen Bereiches mit hoher Empfindlichkeit

5.2.4 Konzeption des Systems zur Empfindlichkeitsbestimmung



Abbildung 34: **links:** Schrittmotor 17DRV014 **[23]; rechts:** Schrittmotorcontroller BSC203 **[22]**

Zur präzisen Ausrichtung des Abstandes wird der motorisierte Fahrtisch der Firma Thorlabs genutzt. Dieser besteht aus einem zweiphasigen 17DRV014 Schrittmotor (Abbildung 34 links) mit einem Arbeitsbereich von 50 mm und einer Auflösung von 50 nm [23], welcher eine vertikale Verschiebung entlang der z-Achse durchführt. Der Schrittmotor wird durch die

Schrittmotorsteuerung BSC203 verwaltet (Abbildung 34 rechts). Die Ansteuerung des Schrittmotors wird durch die Anwendung APT-User von Thorlabs gewährleistet. Parallel zur z-Achse ist eine Platte arretiert, auf welche eine Halterung für die zu testenden Spulen befestigt wird (Abbildung 35). Unterhalb dieser Halterung befindet sich eine eingespannte Edelstahlmembran (Abbildung 35). Zur Einstellung der Ausgangslage (0 mm Abstand zwischen Spule und Membran) wird ein 0,1 mm dickes Papier verwendet. Sobald dieses nicht mehr zwischen Spule und Membran eingeführt werden kann, ist ein



Abbildung 35: schematischer Aufbau der Messeinrichtung zur Ermittlung der abstandsabhängigen Resonanzfrequenz



Abstand von maximal 0,1 mm zwischen beiden Komponenten gewährleistet. Diese Position wird als Nullage definiert. Ab dieser Position wird nach jeder abgeschlossenen Impedanzmessung der Abstand in 0,1 mm-Schritten bis 4 mm bzw. 6 mm erhöht.



6. Messergebnisse

Ziel dieses Abschnitts ist die Darstellung der Ergebnisse der konkretisierten Optimierungsansätze. Vereinzelnd werden kurze Zwischendiskussion der Ergebnisse beigefügt, um zentrale Erkenntnisse hervorzuheben und eine Kontinuität zu garantieren. Zu Beginn werden die Ergebnisse der Softwareanpassung dargestellt. Anschließend wird auf die Spulenkonfiguration eingegangen. Zur Bestimmung des Empfindlichkeitsoptimums werden Messungen mithilfe des Thorlabs-Fahrtisches angefertigt und ebenfalls dargestellt. Zum Schluss werden die Ergebnisse des angepassten Gehäuses veranschaulicht.

6.1 Programmablaufoptimierung/Peak-Unterdrückung

Im nachfolgenden werden die Ergebnisse der Softwareoptimierung – wie in Abschnitt 5 angegeben – vorgestellt. In den Zwischendiskussionen sind Einschätzungen zu finden, um Tendenzen der Lösungswege aufzuzeigen. Diverse Abbildungen können über die MATLAB-Anwendung im zusätzlichen Anhang (C) mit der entsprechenden Abbildungsbezeichnung geöffnet werden.

Hardware-Timer (Messergebnis):

Zur Implementierung des Timers ist die Funktion zum Stoppen des Impulszählers mit einem timergesteuerten Interrupt ersetzt worden (Abschnitt 5.1.1). Der Hardware-Timer führt anstelle eines Software-Timers zu keiner Veränderung des Aufkommens von Peaks. Die Interrupt-Routine benötigt exakt 10 ms für seine Ausführung. Wie in Abbildung 36 erkennbar ist, sind bei der Verwendung von ESP-NOW weiterhin Peaks von bis zu 4,49 kHz vorhanden. Sporadisch treten Peaks mit einer Höhe von ca. 1,5 MHz auf.



Abbildung 36: Vergleichsmessung mit implementiertem Hardware-Timer mit und ohne das Sendeverfahren ESP-NOW (**links:** Aufnahme 10-Apr-2022 18.01.06 **rechts:** Aufnahme 10-Apr-2022 18.08.38)



Ohne die Verwendung des Sendeverfahrens ESP-NOW beläuft sich die Schwankung der Frequenz auf 100 Hz (Abbildung 36 rechts).

Zwischendiskussion des Messergebnisses des Hardware-Timers:

Wie eingangs in den technischen Grundlagen erwähnt, ist die Nutzung eines Hardware-Timers grundsätzlich zu empfehlen, da durch die Genauigkeit ausgeschlossen werden kann, dass die Abtastzeit von 10 ms nicht überschritten wird. In den Ergebnissen zum Verhalten des Impulszählers bei Nutzung des Sendeverfahrens ist dargestellt, dass der Timer exakt arbeitet.

Double-Buffer / Ring-Buffer (Messergebnis):

Die Implementierung des Double-Buffers beinhaltet – wie in Abschnitt 5.1.2 dargestellt – das Wechseln einer Variablen, damit Lese- und Schreibzugriff voneinander getrennt ist. Diese Maßnahme führt zu keiner Verhinderung des Auftretens von Peaks. Eine weitere Anpassung durch den schieberegisterartigen Ring-Buffer führt ebenfalls zu keiner Verbesserung der Problematik, weshalb nur die Ergebnisse des Ring-Buffers dargestellt sind (keine Unterscheidung der Messsignale).



Abbildung 37: exemplarische Vergleichsmessung mit implementiertem Ring-Buffer mit und ohne das Sendeverfahren ESP-NOW; dasselbe weist auch der Ring-Buffer auf

Unter Verwendung von ESP-NOW sind Peaks von bis zu 6,1 kHz erkennbar (Abbildung 37 links). Ohne die Nutzung von ESP-NOW sind Schwankungen von 100 – 200 Hz üblich (Abbildung 37 rechts).

Zwischendiskussion des Messergebnisses zum Double-Buffer / Ring-Buffer:

Obwohl Double- und Ring-Buffer keine Verbesserung der Peak-Problematik verursacht, ist die Verwendung des Ring-Buffers dennoch zu empfehlen. Dies ist damit begründet, dass mit einem Buffer grundsätzlich das Lesen und Schreiben von Daten voneinander getrennt ist und sichergestellt wird, dass aus diesem Teil des Programmes keine Konflikte entstehen.



Semaphore / Mutex (Messergebnis):

Die Koordination des Sendevorgangs durch die Sperrung mithilfe eines Mutex-Tokens führt zu keiner Verhinderung des Auftretens von Peaks. Die Verwendung eines Mutexes ist zunächst ausschließlich für den Programmbestandteil verwendet worden, der das Senden der Daten auslöst (ESP-NOW).



Abbildung 38: Messsignal bei Verwendung des Mutex-Verfahrens; Peak-Erscheinung mit Frequenzanhebungen zwischen 50 - 100 kHz

Innerhalb der Aufnahme sind Peaks von bis zu 100 kHz entstanden, welche dauerhaft und sehr unregelmäßig auftreten (Abbildung 38). Es ist gegenüber den übrigen Messungen auffällig, dass die Streuung der Peaks zunimmt und die Peaks mit 50 – 100 kHz höher ausfallen. Die Aufteilung weiterer Programmbestandteile wie die Berechnung der Frequenz in weiteren Aufgaben (Tasks) führt zu keiner Änderung des Verhaltens während der Ausführung des Programmes.



Interrupt (Messergebnis):

Abbildung 39: Messsignal bei Verwendung der Interrupt-Methode (pegelgesteuert); Peak-Erscheinung mit Frequenzanhebungen zwischen 64 – 102,4 kHz



Die Nutzung von pegelgesteuerten Interrupts führt ebenfalls zu keiner Verhinderung der Peak-Entstehung. Das resultierende Messsignal ähnelt dem Signal des Hardware-Timers und des Double-bzw. Ring-Buffers (Abbildung 39). Die entstehenden Peaks weisen eine Schwankung von bis zu 102,4 kHz auf (Abbildung 39) – ähnlich wie bei dem Mutex-Verfahren. Das gesamte Programm basiert auf der Verwendung von Interrupts, in denen in unterschiedlichen Interrupts die Berechnung und das Senden der Messdaten stattfinden. Neben den vorhandenen Peaks führt der Mikrocontroller in unregelmäßigen Abständen ein Reboot aus.

Zwischendiskussion zu den Messergebnissen der Interrupt-Methodik:

Da die Interrupt-Routinen das aktuelle Hauptprogramm anhält und die Aktion innerhalb des Interrupts ausführt, war die Annahme, dass die entsprechenden Ausführungen nacheinander abgewickelt werden. Allerdings hat dies keinen Einfluss auf den Impulszähler. Der Impulszähler ist ein integriertes Register innerhalb des Mikrocontrollers. Dies bedeutet, dass die Arbeitsweise des Impulszählers losgelöst von dem restlichen Programm stattfindet. ESP-NOW kann in Interrupt-Routinen ausgeführt werden, scheint aber weiterhin die Arbeitsweise des Impulszählers.

Die Vermutung liegt nahe, dass das Sendeverfahren, sofern es auf einem Mikrocontroller ausgeführt wird, die Arbeitsweise des Impulszählers stört. Zur Klärung dient die Beobachtung des zeitlichen Ablaufes des Impulszählers im nachfolgenden Abschnitt.

Problemdarstellung beim Sendeverfahren (Messergebnis):

Die Ausführung des Programmes mit einer Auslösung des Sendeverfahrens über ESP-NOW zeigt zwei wesentliche Unterschiede gegenüber demselben Programm ohne Sendeauslösung. Es existiert eine Diskrepanz bei der Bearbeitungszeit des Impulszählers. Zudem weisen die zuletzt gespeicherten Pulse des PCNT eine deutliche Streuung auf (Abbildung 41). Bei Verwendung von ESP-NOW ist eine Änderung der Zeit zwischen Überlauf (Overflow) und dem Interrupt *read_PCNT* festzustellen. Die Zeit zwischen dem Auslösen des Interrupts bis zum ersten Überlauf des PCNT ist bei Verwendung des Sendeverfahrens 1 ms kürzer (Abbildung 40). Die Anzahl der gezählten Überläufe ist gleich ([B], [C]). Der zweite Unterschied ist die Variation der zuletzt gespeicherten Pulse, welche sich bis zu 1099 Pulse zum Vorwert



Abbildung 40: schematische Zeitabfolge mit und ohne Sendeverfahren ESP-NOW; a) Zeitablauf mit ESP-NOW; b) Zeitablauf ohne ESP NOW



unterscheiden ([B], [C]). Ohne Sendeauslösung variieren die zuletzt gelesenen Pulse zum Vorwert um maximal zwei Pulse ([B], [C]). In beiden Varianten wurde die Interrupt-Routine *read_PCNT* ordnungsgemäß über einen Hardware-Timer alle 10 ms ausgelöst ([B], [C]). Dies zeigt, dass der Hardware-Timer zuverlässig und genau arbeitet und im Zusammenhang mit ESP-NOW nicht beeinflusst ist.

Eine Messung mit einer höheren Frequenz löst mehrere Überläufe aus (Abbildung 41). Bei genauerer Betrachtung der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Überläufen fällt auf, dass die Zeit bis zum nächsten Überlauf zwischen 1 ms und 2 ms variiert, obwohl das Signal sich nicht ändert (Abbildung 41).

Overflow: 286	1 ms
Overflow: 287	2 ms
Overflow: 289	1 ms
Overflow: 290	2 ms
Overflow: 292	1 ms
Overflow: 293	1 ms
Overflow: 294	1 113
Read PCNT: 295	7.1-4-4
1642	Zuleizi
Overflow: 297	gezählte Pulse
Overflow: 299	
Overflow: 300	
Overflow: 301	
Overflow: 303	
Overflow: 304	
Read PCNT: 305	Zuletzt
9541	
Overflow: 307	gezanite Puise
Overflow: 308	
Overflow: 310	
Overflow: 311	
Overflow: 312	
Overflow: 314	
Read PCNT: 315	Zuletzt
15536	gezählte Pulse

Abbildung 41: Anzeige des Zeitwertes in ms der Ausführung der Operationen Overflow und Read PCNT zur Analyse der Zeitvariation des Impulszählers bei Verwendung von ESP-NOW

Zwischendiskussion zum PCNT-Verhalten:

Bei Verwendung von ESP-NOW variierte die Zeit, in der der Impulszähler arbeitet. Vom Auslösen des Interrupts bis zum ersten Overflow ist dieser 1 ms schneller gegenüber der Programmvariante ohne ESP-NOW. Anschließend benötigt er bis zum Auslösen des timergesteuerten Interrupts fünf weitere Millisekunden. Es liegt nahe, dass der Impulszähler unregelmäßig Flanken detektiert, da dieser in seiner Zählgeschwindigkeit variiert. Dies ist mit der Variation der zuletzt ausgelesenen Pulse zu begründen, die nur bei Verwendung von ESP-NOW auftritt. Auf Hardwareebene lässt sich die Gemeinsamkeit finden, dass der Impulszähler und die genutzte WiFi-Schnittstelle für ESP-NOW als Taktgeber "APB-CLK" verwenden (siehe Abschnitt 3.2.2). Scheinbar beeinflusst die Verwendung desselben Taktgebers die Funktionsweise des Impulszählers. An dieser Stelle ist nicht gänzlich auszuschließen, dass es sich bei dem entstandenen Problem um eine Race Condition handelt, ist angesichts dieser Untersuchung in Zusammenhang mit den übrigen Ergebnissen dennoch unwahrscheinlicher. Die nachfolgenden Untersuchungen durch die Anpassung der Software (Trennung von Sendeund Messverfahren) bringt weitere Erkenntnisse, um eine Zuordnung der Problematik treffen zu können, dessen Schlussfolgerung in der Diskussion analysiert wird.



Hardwaretrennung von Sende- und Messverfahren (Messergebnis):

Die getrennte Nutzung von Messung und Versendung der Daten führt zu einem störungsfreien Verhalten. Die seriell zur Verfügung gestellten Frequenzen sind identisch mit den empfangenen Daten eines weiteren Mikrocontrollers (Abbildung 42). Das Messsignal schwankt zwischen 100 – 200 Hz und weist keine weiteren Peaks auf (Abbildung 42).



Abbildung 42: Vergleich zwischen empfangenen und den gemessenen Messdaten bei der Trennung von Messund Sendeverfahren

Die Übertragung der Daten über die serielle Schnittstelle UART zwischen den Mikrocontrollern erfolgt ordnungsgemäß und ohne Einschränkungen.

Zwischendiskussion zur Hardwaretrennung:

Die Tatsache, dass die Trennung zu keiner Störung führt und die bisherigen Softwarelösungen zur Verhinderung einer Race Condition keine Wirkung zeigen, bekräftigt die These, dass ein Fehlverhalten des Impulszählers durch den Dual-Core-Betrieb und der fehlenden Koordination oder durch die Nutzung derselben Taktressourcen verursacht wird.



6.2 Spulenkonfiguration

Im Einzelnen werden die Kapazitäten *C* der Spulen α , γ und η mit den erhaltenen Frequenzen im unbedämpften Zustand über ein Oszilloskop ermittelt. Über die visuelle Darstellung der MATLAB-Anwendung wird der individuelle Verlauf des Messsignals und entstehende Peaks analysiert. Die Berechnungen der Resonanzfrequenz, der Güte und der Eindringtiefe wird parallel durchgeführt und exemplarisch für Spule α aufgezeigt. Die Ergebnisse werden zur Übersicht für alle verwendeten Spulen getrennt dargestellt. Alle ermittelten Daten sind im Anhang "(b) Spulenkonfiguration" als Excel Tabelle zu finden (Tabelle 15, Anhang). Alle Messungen können über die MATLAB-Anwendung im Anhang "(L) Spulenkonfiguration" mit der entsprechenden Datierung dargestellt werden (Übersicht im Anhang (b) - Übersicht Spulenkonfiguration).

6.2.1 Konfiguration Spule α

Da Spule α zu Vergleichszwecken dient, werden nur zwei Zustände des Sensors betrachtet. Im Grundzustand ohne Anpassung der Kapazität beträgt die Frequenz f_{res} = 3,6585 MHz mit einer resultierenden Eindringtiefe von

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_{res} \varkappa \mu_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 3,6585 \ MHz \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 10^6 \frac{S}{m}}} = 0,22238 \ mm.$$

Formel 20: Berechnung der Eindringtiefe der Spule α mit der spezifischen Leitfähigkeit $\varkappa = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2}$, der Permeabilität $\mu_r = 1$ und der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 1, 4 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$

Die Kapazität beträgt bei einer Spuleninduktivität von 24 µH

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{res}}\right)^2}{L} = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 3,6585 \ MHz}\right)^2}{24 \ \mu H} = 78,854 \ pF.$$

Formel 21: Berechnung der Kapazität C der Spule a

Die Messung des Widerstandes R_p ergibt einen Wert von 11465,04806 Ω . Anhand dieser Werte ergibt sich eine Güte von

$$Q = R_p \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} = 11465,04806 \ \Omega \cdot \sqrt{\frac{78,854 \ pF}{24 \ \mu H}} = 20,7817306.$$

Formel 22: Berechnung der Güte der Spule α

Bei einem Bedämpfungsabstand von 2 mm weist das Messsignal sporadisch einsetzende Peaks auf, welche eine maximale Höhe von 2,2 kHz aufweisen (Abbildung 66, Anhang). Unabhängig von diesen Peaks ist eine maximale Schwankung von 500 Hz zu verzeichnen.



Die Frequenz erhöht sich abstandsbedingt auf $f_{res} = 7,611086$ MHz und besitzt eine Eindringtiefe von $\delta = 0,15418$ mm. Bei einer Annäherung der Hand steigt die absolute Frequenz um 22,2 kHz (Abbildung 43) und weist eine maximale Schwankung von 1,1 kHz auf.



Abbildung 43: absolute Frequenzänderung bei Annäherung der Hand bei einem Spulen-Membran-Abstand von 2 mm (Spule α ohne Kapazitätsanpassung) (Aufnahme: 31-Mar-2022 17.40.56)

Bei einem Abstand von 4 mm beträgt die maximale Schwankung 400 Hz bei einer Resonanzfrequenz von f_{res} = 5,573007 MHz. Bei einer Annäherung der Hand steigt die Frequenz um 3,2 kHz (Abbildung 65, Anhang).

Nach der Anpassung der Spule mit einer parallelen Kapazität von 560 pF stellt sich im unbedämpften Zustand eine Resonanzfrequenz von $f_{res} = 1,455$ MHz mit einer Eindringtiefe von $\delta = 0,35263$ mm ein. Das Messsignal streut stark und weist eine Schwankung von teilweise über 10 kHz auf (Abbildung 44).



Abbildung 44: Frequenzverlauf der Spule α ohne Bedämpfung mit starker Schwankung der Frequenzamplitude (Peaks) von ca. 10 kHz

Bei einer Bedämpfung von 2 mm und 4 mm verstärkt sich die Schwankung weiter. Abstandsbedingt ändert sich die Resonanzfrequenz bei einem Abstand von 2 mm auf f_{res} =



3,89 MHz mit einer Eindringtiefe von δ = 0,21567 mm. Bei einem Abstand von 4 mm fällt die Resonanzfrequenz auf f_{res} = 2,74 MHz mit einer Eindringtiefe von δ = 0,25697 mm.

Zwischendiskussion der Messergebnisse der Spule α:

Das Messergebnis zeigt, dass das System bei einer Kapazität von 560 pF ein instabiles Messsignal erzeugt. Ohne Anpassungen werden unerwünschte Peaks erzeugt, welche das Messsignal verfälschen. Zudem ist zu beachten, dass die Eindringtiefe bei einem Abstand von zwei Millimetern auf mindestens 0,21567 mm reduziert wird, sodass das erregende Wechselfeld der Spule durch die leitfähige Membran hindurchscheint. Außerdem ist bei einer Abstandsänderung von vier auf zwei Millimetern eine Frequenzerhöhung von 1,15 MHz als gering einzustufen, was ein Hinweis auf eine geringe Empfindlichkeit gegenüber dem Abstand ist.

6.2.2 Konfiguration Spule γ

Die Spule γ wird ausgehend von der Kapazität im unbedämpften Zustand von $C = 72,38 \, pF$ mit den Parallelkapazitäten 100 pF, 150 pF, 220 pF und 330 pF schrittweise angepasst. Grundsätzlich erniedrigt sich die Frequenz mit steigender Kapazität bei gleichzeitiger Erhöhung der Eindringtiefe (Tabelle 4). Die Güte der Spule γ erhöht sich auf 21,8864963 bei einer Parallelkapazität von 150 pF und sinkt auf 16,0975327 bei einer Parallelkapazität von 330 pF.

Spule γ (unbedämpft)	-	100 pF	150 pF	220 pF	330 pF
f _{res} [MHz]	7,469465	4,896180	4,254526	3,915042	3,352500
<i>C</i> [pF]	72,38	167,72	222,12	262,32	357,74
δ [mm]	0,15564	0,19223	0,20622	0,21497	0,23231
Q	16,1049	20,13871208	21,8864963	15,6048643	16,0975327
Max. Schwankung [Hz]	300	200	100	100	200
Frequenzänderung in 25 s [Hz]	1000	300	200	1600	800

Tabelle 4: Messergebnisse der Spule γ im unbedämpften Zustand mit den Parallelkapazitäten 0 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_{res} : Resonanzfrequenz, C: Kapazität, δ : Eindringtiefe, Q: Güte

Im unbedämpften Grundzustand der Spule γ stellt sich eine Resonanzfrequenz von f_{res} = 7,469465 MHz ein. Ohne Bedämpfung erhöht sich die Frequenz während der 25-sekündigen Aufnahme des Signals von 7,4192 MHz um 1 kHz bei einer maximalen Schwankung von 300 Hz (Tabelle 4). Mit der Erhöhung der Kapazität auf 150 pF sinkt die Frequenzänderung



kontinuierlich auf 200 Hz und die maximale Schwankung auf 100 Hz. Bei dieser Parallelkapazität weist die Spule γ bei höchster annehmbarer Güte die geringsten Schwankungen auf (Abbildung 70, Anhang). Bei weiterer Erhöhung der Kapazität sinkt insgesamt die Güte und die maximale Schwankung sowie die Frequenzänderung erhöhen sich (Tabelle 4).

2 mm-Bedämpfung der Spule y:

Spule γ (2 mm Abstand)	-	100 pF	150 pF	220 pF	330 pF
f _{res} [MHz]	14,60843	9,77117	8,210524	7,1494	6,35649
δ [mm]	0,11129	0,136076	0,14845	0,15908	0,16871
Max. Schwankung [Hz]	27700	600	600	700	20500
Frequenzänderung in 25 s [Hz]	2700	33500	11200	5800	22100
Max. Schwankung durch die Hand [Hz]	7500	1100	1100	800	-
Frequenzerhöhung durch die Hand [Hz]	42200	2800	14600	5700	-

Tabelle 5: Messergebnisse der Spule γ mit Bedämpfung (2 mm) und mit den Parallelkapazitäten 0 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_{res} : Resonanzfrequenz, C: Kapazität

Abstandsbedingt steigen die Frequenzen jeder Konfiguration bei einem Abstand von 2 mm ungefähr um den Faktor zwei gegenüber dem ungedämpften Zustand. Die Eindringtiefen des Erregerfeldes sind in jeder Anpassungsform unterhalb von 0,2 mm (Tabelle 5). Die stärksten Schwankungen des Messsignals zeigen sich bei unangepasster Spule und bei einer Konfiguration mit einer Parallelkapazität von 330 pF. Ohne Anpassung kommt es zu einer Häufung von überhohen Peaks von bis zu 27 kHz (Tabelle 5 und Abbildung 67, Anhang). Die Konfiguration mit einer Kapazität von 330 pF erzeugt ein generell verrauschtes Messsignal (Abbildung 68, Anhang). Anpassungen mit den Kapazitäten von 100 pF und 150 pF weisen identische maximale Schwankungen auf - sowohl im ruhenden Zustand als auch bei Annäherung der Hand. Allerdings weisen sie Unterschiede in der 25-sekündigen Frequenzänderung auf, bei der die 100-pF-Konfiguration eine höhere Änderung von 33,5 kHz zeigt (Tabelle 5). Bei der Frequenzerhöhung durch die Annäherung der Hand ist eine Steigerung von 14,6 kHz der 150-pF-Konfiguration festzustellen, welche sich von den übrigen Konfigurationen abhebt (abgesehen von der unangepassten Konfiguration). Lediglich die 220pF-Konfiguration weist die geringste Änderung und Erhöhung der Frequenz auf (Tabelle 5). Dennoch zeigen sich vereinzelt stärkere Peaks und leichte Einbrüche der Frequenz, was für eine Instabilität spricht (Abbildung 69, Anhang).


Da das Signal der unangepassten Spule und der 330 pF-Konfiguration äußerst instabil ist, werden diese in der weiteren Bearbeitung nicht weiter berücksichtigt.

Spule γ (4 mm Abstand)	100 pF	150 pF	220 pF
f _{res} [MHz]	7,125225	6,298866	5,7121
δ [mm]	0,159352	0,16948	0,17797
Max. Schwankung [Hz]	500	500	200
Frequenzänderung in 25 s [Hz]	2000	3500	700
Max. Schwankung durch die Hand [Hz]	400	500	300
Frequenzerhöhung durch die Hand [Hz]	1200	3900	4200

4 mm-Bedämpfung der Spule γ:

Tabelle 6: Messergebnisse der Spule γ mit Bedämpfung (4 mm) und mit den Parallelkapazitäten 100 pF, 150 pF und 220 pF; f_{res} : Resonanzfrequenz, C: Kapazität

Bei einem Abstand von 2 mm weisen die Konfiguration mit 100 pF, 150 pF und 220 pF insgesamt ein stabileres Verhalten auf (Tabelle 6). Es treten keine sporadischen Peaks auf der Grundfrequenz auf, welche das Messergebnis beeinflussen oder verfälschen können (Abbildung 72, Anhang). Innerhalb der Messdauer von 25 Sekunden zeigen sich Unterschiede in der Empfindlichkeit. Die 150-pF-Konfiguration weist insgesamt die stärkste Änderung des Messsignals auf. Dabei ist der Unterschied der Frequenzerhöhung der 150-pF- und 220-pF-Konfiguration von 300 Hz vernachlässigbar gering (Tabelle 6). Weiter Unterschiede sind im Verlauf des Messsignals innerhalb der 25-sekündigen Aufnahme erkennbar. Die 100-pF- und 220-pF-Konfiguration weisen einen schwankenden Verlauf auf, wohingegen die 150-pF-Konfiguration insgesamt eine steigende Tendenz aufweist (Abbildung 72, Anhang).

Zwischendiskussion der Messergebnisse der Spule y:

Im Vergleich zur Spule α sind die Frequenzen im bedämpften Zustand mindestens um ungefähr 2 MHz höher (Abbildung 45). Dies ist vorteilhaft, da die Eindringtiefe von 0,2 mm nicht unterschritten wird (Tabelle 5 und Tabelle 6). Das stabilste Verhalten mit der stärksten Reaktion bei Bedämpfung und Annäherung der Hand bietet die 150-pF-Konfiguration. Diese Konfiguration weist mit Q = 22 die höchste Güte auf. Es ist ersichtlich, dass das Messsignal robust (stabiler Verlauf im bedämpften und unbedämpften Zustand) und gleichzeitig empfindlich gegenüber Änderungen ist. Außerdem weist die 150-pF-Konfiguration keinerlei unerwünschte Effekte im Messsignal auf, welche das Ergebnis beeinträchtigen (Abbildung 71, Anhang). Aus diesem Grund wird für die weitere Analyse der Spulenkonfiguration die 150-pF-



Konfiguration der Spule γ in Betracht gezogen. Die weiteren Ergebnisse der Spule η werden mit der bisherigen Auswahl verglichen, um eine endgültige Entscheidung treffen zu können.



Abbildung 45: Gegenüberstellung der Resonanzfrequenz der Spule α und γ bei einer 2 mm-Bedämpfung

6.2.3 Konfiguration Spule η

Alle hier verwendeten Daten sind der Tabelle 12 aus dem Anhang entnommen. Die Spule η wird ausgehend von der Kapazität im unbedämpften Zustand von $C = 35,5957 \, pF$ mit den Parallelkapazitäten 47 pF, 56 pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 330 pF schrittweise angepasst. Grundsätzlich erniedrigt sich die Frequenz mit steigender Kapazität bei gleichzeitiger Erhöhung der Eindringtiefe. Die Güte erhöht sich auf 38,7224121 bis zu der Parallelkapazität von 150 pF und sinkt auf 20,3400659 bei einer Parallelkapazität von 330 pF. Die höchste Güte erreicht die unangepasste Konfiguration. Das Messsignal der



Abbildung 46: Vergleich der maximalen Schwankung und der Frequenzänderung der Spule η in unbedämpften zustand



unangepassten Konfiguration weist im unbedämpften Zustand starke Schwankungen von bis zu 2,1 kHz auf (Abbildung 73, Anhang). Die geringste Schwankung von 100 Hz werden von den Konfigurationen mit den Kapazitäten 56 pF, 68 pF und 100 pF erzeugt. Sie führen innerhalb der 25 Sekunden langen Messung eine maximale Frequenzänderung von 200 Hz aus (Abbildung 46). Höhere und niedrigere Kapazitäten führen zu einer erhöhten Schwankung von bis zu 400 Hz (Abbildung 46).

Bei Kapazitäten unter (Abbildung 73) und oberhalb (Abbildung 74, Abbildung 75) von der 68pF-Konfiguration sind stärkere Variationen der Frequenz im Verlauf der Messung zu erkennen, welche sich zur niedrigsten und zu höchsten Kapazität verstärken (Abbildung 46). Die Güte des Schwingkreises der 68-pF-Konfiguration beträgt lediglich 36,8256127 und stellt nicht den höchsten Wert dar, welcher bei der 150-pF-Konfiguration zu finden ist. Bis auf die 220-pF- und 330-pF-Konfiguration bleiben die angepassten Spulen unterhalb der 0,2-mm-Grenze (Tabelle 12, Anhang).

Zwischendiskussion zur unbedämpften Spule n:

Aufgrund der Tatsache, dass die Frequenzschwankungen und die Frequenzänderung der Spulenkonfigurationen mit den Kapazitäten von 56 pF, 68 pF und 100 pF sehr gering sind, wird der Fokus im nachfolgenden auf diese gelegt. Die unangepasste Spule η wird gänzlich nicht mehr betrachtet, da diese Spulenkonfiguration zu unerwünschtem Peak-Verhalten führt. Ebenso ist zu bemerken, dass aufgrund der Eindringtiefe von maximal 0,2 mm sich die Frequenz nicht unterhalb von 4,523267 MHz aufhalten sollen. Die Frequenzen der Konfiguration mit 150 pF, 220 pF und 330 pF Kapazität befinden sich unterhalb oder genau an der Frequenzgrenze. Die weiteren Messergebnisse durch die Bedämpfung der Spule werden Aufschluss geben, ob diese für eine endgültige Konfiguration in Betracht gezogen werden können.



2 mm-Bedämpfung der Spule η:



Abbildung 47: Maximale Frequenzschwankung der Spule η bei einer 2 mm-Bedämpfung mit und ohne äußere Beeinflussung (Annäherung der Hand)

Alle hier verwendeten Daten sind der Tabelle 13 aus dem Anhang entnommen. Die höchste Frequenz ist bei einer Konfiguration von 47 pF Kapazität mit 16,71588 MHz erreicht. Die kleinste Frequenz beträgt 7,9356 MHz (330-pF-Konfiguration). Die Eindringtiefe jeder Spulenkonfiguration ist unterhalb von 0,2 mm. Durch die Erhöhung der Kapazität sinkt kontinuierlich die maximale Schwankung - welche durch die Annäherung der Hand verursacht wird - von 3,4 kHz auf 800 Hz (Abbildung 47). Die maximale Schwankung der Frequenz ohne äußere Beeinflussung steigt bis zu 1.2 kHz bei einer Kapazität von 100 pF und fällt anschließend auf 500 Hz bis 700 Hz (Abbildung 47). Die maximale Frequenzänderung bei einer Annäherung der Hand ist bei der 68-pF-Konfiguration von 24,3 kHz zu finden. Höhere Kapazitäten verringern die Frequenzänderung auf 3,3 kHz bis 8,1 kHz, ebenso wie kleinere Kapazitäten (zwischen 11,7 kHz bis 14,4 kHz). Ohne äußere Beeinflussung steigt die maximale Frequenzänderung bei einer Kapazität von 100 pF auf 23,7 kHz (Abbildung 48). Anschließend bricht die Änderung auf 11,9 kHz ein (150 pF Kapazität) bis eine maximale Änderung von 31,9 kHz bei 220 pF Kapazität erreicht wird (Abbildung 48). Die Konfigurationen mit den Kapazitäten von 47 pF, 150 pF und 220 pF weisen stärkere Variationen der Frequenz im Verlauf der Messung auf (Abbildung 77, Abbildung 78, Anhang), was für ein instabiles Verhalten spricht. Die Frequenzverläufe der Konfigurationen mit 56 pF, 68 pF und 100 pF Kapazität zeigen hingegen eher einen ruhigeren Verlauf (Abbildung 77, Anhang). Letztlich weist die 330-pF-Konfiguration eine massive Häufung von Peaks auf, welche das Messsignal gänzlich überlagert (Abbildung 76, Anhang).





Abbildung 48: Maximale Frequenzänderung der Spule η bei einer 2 mm-Bedämpfung mit und ohne äußere Beeinflussung (Annäherung der Hand)

Zwischendiskussion der 2-mm-Bedämpfung der Spule n:

Aufgrund der in den Optimierungsansätzen gewählten Kriterien zur Wahl einer geeigneten Konfiguration (Abschnitt 5.2.2) werden die Konfigurationen mit 220 pF und 330 pF Kapazität wegen ihrer zu geringen Resonanzfrequenz (7,9356 MHz bis 9,78102 MHz) nicht weiter in Betracht gezogen. Letztere Konfiguration neigt zusätzlich bei einem Abstand von 2 mm zu einem instabilen Verhalten. Die Variation der Frequenzen – insbesondere der Konfigurationen mit 47 pF und 150 pF Kapazität – führen zu weiteren Ausschlüssen der Konfigurationen. Die Analyse der Daten der einzelnen Spulenkonfigurationen bei einer Bedämpfung von vier Millimetern sind für die weitere Eingrenzung notwendig.

<u>4 mm-Bedämpfung der Spule η:</u>

Alle hier verwendeten Daten sind der Tabelle 14 aus dem Anhang entnommen. Grundsätzlich befindet sich die Eindringtiefe jeder Spulenkonfiguration unterhalb von 0,2 mm. Abstandsbedingt bewegen sich die Resonanzfrequenzen der Konfigurationen zwischen 11,739921 MHz (47 pF Kapazität) und 7,645158 MHz (150 pF Kapazität). Hier erweist sich die maximale Schwankung der Konfigurationen mit 56 pF, 68 pF und 100 pF Kapazität als gleichbleibend (Abbildung 49). Unter- und oberhalb dieser Kapazitäten sind die Schwankungen gegenüber äußeren Einflüssen mindestens um das Zweifache größer (Abbildung 49). Die Konfigurationen mit 47 pF, 56 pF und 100 pF Kapazität zeigen insgesamt





eine höhe Variation der Frequenz – besonders die 47-pF-Konfiguration (Abbildung 77, Anhang).

Abbildung 49: Maximale Frequenzschwankung der Spule η bei einer 4 mm-Bedämpfung mit und ohne äußere Beeinflussung (Annäherung der Hand)

Die geringste Frequenzänderung durch eine Annäherung der Hand ist bei einer Parallelkapazität von 68 pF mit 700 Hz zu finden (Abbildung 50), was mit einer Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen einhergeht. Gleichzeitig weist diese Spulenkonfiguration eine hohe Frequenzänderung von 5,2 kHz auf (Abbildung 50), sodass kleinere Abstandsänderungen einen großen Einfluss auf die Resonanzfrequenz ausüben.



Abbildung 50: Maximale Frequenzänderung der Spule η bei einer 4 mm-Bedämpfung mit und ohne äußere Beeinflussung (Annäherung der Hand)



Zwischendiskussion der 4-mm-Bedämpfung der Spule n:

Da die Spulenkonfigurationen mit 100 pF (9,222388 MHz) und 150 pF (7,645158 MHz) Kapazität Resonanzfrequenzen unterhalb von 10 MHz aufweisen, sind diese für die Wahl einer geeigneten Konfiguration ausgeschlossen. Die Variationen der Frequenzverläufe der Spulen mit einer Parallelkapazität von 47 pF und 56 pF sind stärker ausgeprägt als dieser der 68-pF-Konfiguration. Insgesamt zeigt die Spulenkonfiguration mit einer Parallelkapazität von 68 pF bei allen getesteten Abständen ein stabiles Messsignal bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit gegenüber einer Abstandsänderung. Aus diesem Grund wird für die Wahl der Spulenkonfiguration die 68-pF-Konfiguration der Spule η in Betracht gezogen. Die entsprechende Gesamtauswahl wird in der Auswertung der Ergebnisse dargestellt.



6.3 Empfindlichkeit des Messsystems

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Empfindlichkeitsbestimmung der Spulen α , γ und η dargestellt. Da aus der Spulenkonfiguration hervorgegangen ist, dass die jeweiligen Spulen ohne zusätzliche Parallelkapazität sowie mit einer Parallelkapazität von 330 pF nicht geeignet sind, werden die übrigen Konstellationen in diesem Abschnitt dargestellt. Dabei wird zwischen den Spulen α , γ und η unterschieden. Alle ermittelten Daten sind im Anhang "(c) Empfindlichkeit" als Excel Tabelle zu finden. Alle Messungen können über die MATLAB-Anwendung im Anhang "(K) Empfindlichkeit" mit der entsprechenden Spulenkonfigurationen dargestellt werden.

6.3.1 Empfindlichkeit Spule α

Alle hier verwendeten Daten sind der Tabelle 16 aus dem Anhang entnommen. Die Darstellung der Empfindlichkeit von Spule α bezieht sich ausschließlich auf die 560 pF-Konfiguration und soll als Referenz für die weiteren Spulen genutzt werden. Die Messung erfolgt ab dem definierten Nullpunkt bis zu einem Abstand von 2 mm zwischen der Spule und der Membran. Höhere Abstände führen zu keiner deutlichen Änderung der Resonanzfrequenz. Die höchste Empfindlichkeit der Spule α pro 0,1 mm beträgt 80,1 kHz und befindet sich zwischen den Abständen 0,2 mm und 0,3 mm (Abbildung 51). Die Empfindlichkeit sinkt auf 22,528 kHz / 0,1 mm zwischen den Abständen 1,9 mm und 2 mm. Die Frequenz nimmt ab der Nulllage um 952,441 kHz auf 2,138924 MHz ab (2 mm Abstand).Die maximal zu erreichende Frequenz bei Nulllage beträgt 3,091364 MHz.



Abbildung 51: abstandsabhängige Resonanzfrequenz der Spule α mit 560 pF Kapazität



Die Selbstinduktivität der Spule α bei einem Spulen-Membran-Abstand von 1 mm liegt bei 8,3072 µH und die berechnete Gegeninduktivität der Simulation beträgt 15,092 µH. In Summe ergibt dies eine Induktivität von 23,3995 µH, was im Wesentlichen der Gesamtinduktivität von 24 µH im unbedämpften Zustand entspricht. Die gemessene Frequenz von 2,4731 MHz und die simulierte Frequenz von 2,3883 MHz unterscheiden sich um 84,809 kHz. Bis zu einem Abstand von zwei Millimetern ist bei der Messung und der Simulation eine fallende Tendenz zu erkennen. Allerdings sinkt die Frequenz der Simulation deutlich langsamer, sodass die berechneten Gegeninduktivitäten ebenfalls langsamer fallen (Abbildung 52). Der Frequenzunterschied bei 2 mm Abstand beträgt 157,932 kHz, wobei die Simulation eine höhere Frequenz von 2,2969 MHz aufweist.



Abbildung 52: Vergleich der Resonanzfrequenz und der Gegeninduktivität zwischen Realmessung und Simulation der Spule

Zwischendiskussion des Empfindlichkeitsmessergebnisses der Spule *a*:

Angesichts der niedrigen Resonanzfrequenz von 3,0914 MHz bei Nulllage ist die Spule α gänzlich ungeeignet, da das magnetische Wechselfeld der Spule mit einer Eindringtiefe von ca. 0,24 mm durch die Membran scheint. Die Empfindlichkeit von maximal 80,1 kHz pro 0,1 mm ist bezogen auf den Abstand zur Membran als gering einzustufen. Anhand der Spule α ist keine Aussage für eine ideale Abstandseinstellung zu treffen. Die nachfolgenden Messergebnisse werden diese These bekräftigen. Grundsätzlich ist die Simulation der abstandsabhängigen Resonanzfrequenz als eine Näherung zur Überprüfung zu verstehen. Im Zuge dieser Vergleichsmessung fällt auf, dass die Realmessungen einen steileren Verlauf aufweisen (Abbildung 52). Dies hängt damit zusammen, dass die Simulation der MATLAB-



Anwendung nicht alle Parameter der Spule exakt nachstellen kann. Für die weiteren Ausführungen zur Bestimmung einer geeigneten Empfindlichkeit spielt die Gegeninduktivität der Simulation eine untergeordnete Rolle und wird nicht weiterverfolgt.



6.3.2 Empfindlichkeit Spule γ

Abbildung 53: Aufnahme der der abstandsabhängigen Resonanzfrequenz der unterschiedlichen Spulenkonfigurationen der Spule y mithilfe des Impedanzanalysators

Alle hier verwendeten Daten sind Tabelle 17, Tabelle 18 und Tabelle 19 aus dem Anhang entnommen. Zur Bestimmung der Empfindlichkeit ist der Abstand zwischen 0 – 4 mm gewählt. Dabei zeigen alle Konfigurationen (100 pF, 150 pF und 220 pF) einen ähnlichen Verlauf bei Abstandsabnahme. Es ist ein Frequenzbereich von 5,27784 MHz (Abstand: 4 mm; 220-pF-Konfiguration) bis zu 13,54193 MHz (Abstand: 0 mm; 100-pF-Konfiguration) abgedeckt (Abbildung 53). Die stärkste Steigung von 663,329 kHz befindet sich zwischen einem Abstand von 0 mm bis 0,1 mm der 100 pF-Spulenkonfiguration. Darunter ordnet sich die Konfiguration mit 150 pF Parallelkapazität ein, welche eine Empfindlichkeit von 595.744 kHz pro 0,1 mm-Abstand (zwischen 0,2 mm und 0,3 mm) aufweist. Die Empfindlichkeiten aller Spulenkonfigurationen nehmen insgesamt mit wachsendem Abstand ab. Dabei sinkt die Empfindlichkeitsänderung pro 0,1 mm mit zunehmendem Abstand nicht gleichmäßig und erhöht sich zum Teil trotz zunehmenden Abstandes (Abbildung 54). Die Frequenzen sinken kontinuierlich mit zunehmendem Abstand, sodass die Eindringtiefe steigt. Die Eindringtiefe von 0,2 mm ist in keiner Konstellation überschritten (höchster Wert: 0,18515 mm bei 220-pF-Konfiguration). Die Mindesteindringtiefe beträgt 0,11559 mm bei einer Parallelkapazität von 100 pF und einem Abstand von 0 mm.





Abbildung 54: Vergleich des Empfindlichkeitsverlaufes der Spulen y pro 0,1 mm-Schritt

Im direkten Vergleich stellt sich heraus, dass die Resonanzfrequenz der 150-pF-Konfigurationen unter 2,6 mm Abstand gegenüber der 220-pF-Konfiguration und unter 0,5 mm Abstand gegenüber der 100-pF-Konfiguration stärker anwächst (Abbildung 53). Im Wesentlichen verläuft die Kurve der Resonanzfrequenz der 150-pF- Konfiguration über den Übrigen.

Im Vergleichsintervall zwischen zwei und vier Millimetern Spule-Membran-Abstand ist die maximal mögliche Empfindlichkeit von 12,015 kHz pro 0,1 mm bei einer Frequenz von 8,312891 MHz erreicht (Tabelle 7). Dennoch ist die Änderung der Empfindlichkeit bei der 150pF-Konfiguration mit ca. 70 kHz um 5 kHz stärker als bei der 100-pF -Konfiguration (Tabelle 7).

Abstand	<i>E</i> (100 pF)	<i>E</i> (150 pF)	<i>E</i> (220 pF)	f _{res}	f _{res}	f _{res}
	$\left[\frac{Hz}{2}\right]$	$\left[\frac{Hz}{2}\right]$	$\left[\frac{Hz}{2}\right]$	(100 pF)	(150 pF)	(220 pF)
	-0,1 mm-	-0,1 mm-	-0,1 mm-	[MHz]	[MHz]	[MHz]
2 mm	120150,19	115143,93	80100,13	8,312891	7,418023	6,336671
4 mm	55068,84	45056,32	40050,06	6,931164	6,086358	5,277847
Differenz (2 – 4 mm)	65081,35	70087,61	40050,07	1,381727	1,331665	1.058823

Tabelle 7: Empfindlichkeiten E und Resonanzfrequenzen f_{res} bei den Abständen 2 mm und 4 mm (Spule γ)



Die berechneten Gegeninduktivitäten aller Spulenkonfigurationen weisen keine nennenswerten Unterschiede bei Annäherung auf. Gemäß der Formel 12 sinkt die Selbstinduktivität näherungsweise linear zur quadratischen Änderung der Resonanzfrequenz, wodurch die Gegeninduktivität näherungsweise linear steigt (Abbildung 55). Aufgrund der Bauweise der Spulen ist der Verlauf ähnlich. Unterschiede sind in der absoluten Höhe der erzeugten Gegeninduktivitäten erkennbar, bei welcher die stärkste Gegeninduktivität bei der Spule mit der höchsten Güte auftritt (Güte 150 pF-Konfiguration: 21,89).



Abbildung 55: Darstellung der berechneten Gegeninduktivitäten der Spule y in Abhängigkeit des Abstandes

Zwischendiskussion des Empfindlichkeitsmessergebnisses der Spule γ :

In Anbetracht der Ergebnisse der Spulenkonfiguration der Spule γ ist zu berücksichtigen, dass die 150 pF-Konfiguration das stabilste Messsignal erzeugt. Letztlich zeigen die Ausführungen, dass die abstandsabhängige Empfindlichkeit dieser Spulenkonfiguration im Vergleich zu den Übrigen nicht deutlich hervorsticht, aber abschnittsweise die höchste Empfindlichkeit bei hoher Güte aufweist. Aus diesem Grund ist diese Spulenkonfiguration als geeignet zu betrachten.

Die Messergebnisse veranschaulichen auch, dass die Höhe der resultierenden Resonanzfrequenz einen bedeutenden Einfluss auf die Empfindlichkeit ausübt. Je höher diese ist, desto stärker ist die Empfindlichkeit. Dieser Zusammenhang spielt bei der Diskussion über eine geeignete Empfindlichkeitskonfiguration und der Betrachtung der Spulenkonfigurationen der Spule η eine zentrale Rolle.

6.3.3 Empfindlichkeit Spule η

Alle hier verwendeten Daten sind Tabelle 20, Tabelle 21, Tabelle 22, Tabelle 23, Tabelle 24 und Tabelle 25 aus dem Anhang entnommen. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse



der Spulenkonfiguration der Spule η (Abschnitt 6.2.3) ist der Fokus auf folgende Konfigurationen gesetzt:

- 1. Spule η mit 47 pF Parallelkapazität
- 2. Spule η mit 56 pF Parallelkapazität
- 3. Spule η mit 68 pF Parallelkapazität



Abbildung 56: Gegenüberstellung aller Spulenkonfigurationen der Spule η aus den Messungen mithilfe des Impedanzanalysators mit 10 MHz-Schwelle

Höhere Kapazitäten weisen eine zu geringe Resonanzfrequenz von unter 10 MHz bei einem Bedämpfungsabstand von 4 mm auf. Die Eingrenzung der Konfigurationen ist in Abbildung 56 dargestellt, in der eine Gesamtaufstellung aller Konfigurationen zu erkennen ist. Die Spulenkonfigurationen mit den Kapazitäten 100 pF, 150 pF und 220 pF können die 10 MHz-Schwelle als Mindestvoraussetzung nicht erfüllen. Die abstandsabhängigen Frequenzverläufe zeigen alle Ähnlichkeiten auf und unterscheiden sich in der Empfindlichkeit. Zur Bestimmung



Abbildung 57: Vergleich des Empfindlichkeitsverlaufes der Spulen η pro 0,1 mm-Schritt



der Empfindlichkeit ist der Abstand zwischen 2 – 6 mm gewählt, da die Bauart der Spule η keinen geringeren Abstand zulässt.

Die nutzbaren Konfigurationen decken einen Frequenzbereich von 10,25782 MHz (Abstand: 6 mm; 68-pF-Konfiguration) bis zu 20,21151 MHz (Abstand: 2 mm; 47-pF-Konfiguration) ab. Die maximale Empfindlichkeit tritt mit 578,222 kHz pro 0,1 mm Abstand bei der 47-pF-Konfiguration auf und sinkt bei steigender Kapazität (Tabelle 8). Wie bereits bei der vorherigen Spulenkonfiguration (Spule γ) nimmt die Empfindlichkeit nicht gleichmäßig, aber kontinuierlich mit größer werdendem Abstand ab (Abbildung 57). Der Messverlauf aus Abbildung 57 veranschaulicht, dass bis auf wenige Ausnahmen die 47-pF-Konfiguration durchgängig die stärkste Empfindlichkeit aufweist. Dies resultiert aus der allgemein hohen Resonanzfrequenz, welche die Gesamtempfindlichkeit vergrößert. Die resultierenden Eindringtiefen unterschreiten in keiner Konstellation den Mindestwert von 0,2 mm.

Abstand	<i>E</i> (47 pF)	E (56 pF)	E (68 pF)	fres	f _{res}	fres
	$\left[\frac{Hz}{24}\right]$	$\left[\frac{Hz}{2}\right]$	$\left[\frac{Hz}{2}\right]$	(47 pF)	(56 pF)	(68 pF)
	-0,1 mm-	-0,1 mm-	-0,1 mm-	[MHz]	[MHz]	[MHz]
2 mm	578222	495619	450563	19,63329	17,67209	16,00751
4 mm	140175	125156	115143	13,85857	12,82103	11,70213
Differenz (2 – 4 mm)	438047	370463	335420	5,77472	4,85106	4,30538

Tabelle 8: Empfindlichkeiten E und Resonanzfrequenzen f_{res} bei den Abständen 2 mm und 4 mm (Spule η)

Der Vergleich der Gegeninduktivitäten weist keine Unregelmäßigkeiten auf (Abbildung 58). Die stärkste Gegeninduktivität erzeugt die 47-pF-Konfiguration mit maximal 4,564 μ H bei einem Abstand von 2 mm. Alle weiteren Konstellationen liegen nur 0,1 – 0,2 μ H darunter. Dies kommt zustande, da die Geometrie der Spule unverändert ist und sich das erzeugte magnetische



Abbildung 58: Vergleich der Gegeninduktivitäten der Spulenkonfigurationen (Spule η)



Wechselfeld dementsprechend gleich im Raum verteilt. Lediglich die Frequenz des Wechselfeldes erfährt eine spürbare Änderung.

Zwischendiskussion des Empfindlichkeitsmessergebnisses der Spule n:

Mit Empfindlichkeiten von bis zu 578,222 kHz pro 0,1 mm bei einem Bedämpfungsabstand von 2 mm und Resonanzfrequenzen über 10 MHz eignen sich grundsätzlich alle getesteten Konfigurationen. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse zur Spulenkonfiguration der Spule η ist die 68-pF-Konfiguration zu bevorzugen, da sie das stabilste Messsignal hervorbringt.

6.4 Versuch zur Masseneffektminimierung

Für den Vergleich und zur Bewertung des angepassten Gehäuses wird die Spule η mit einer Parallelkapazität von 68 pF zwischen einem Abstand von 2 – 4 mm zur Membran verwendet. Die Einstellung des Abstandes erfolgt wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben. Alle ermittelten Daten sind im Anhang "(d) Masseneffekt Membran" als Excel Tabelle zu finden. Alle Messungen können über die MATLAB-Anwendung im Anhang "(L) Masseneffekt" mit der entsprechenden Spulenkonfigurationen dargestellt werden.

6.4.1 Vergleich der Messdaten bei 2 mm Abstand mit 12°- und 25°-Neigung:

Alle hier verwendeten Daten liegen den Messdaten der Tabelle 26 aus dem Anhang zugrunde. Bei einer Neigung von 25° ergeben sich unterschiedliche Frequenzanhebung (Abbildung 59). Mit einer Anhebung von 61,8 kHz erhöht sich die Frequenz des Systems ohne Dichtungsring nur halb so viel gegenüber der Variante mit Dichtungsring (Tabelle 9). Die maximalen Peaks, welche durch die einzelnen Tropfen verursacht werden, sind mit 48,3 kHz etwa doppelt so hoch (Tabelle 9). Bei einer 12°-Neigung ist die Frequenzanhebung bei fehlendem



Abbildung 59: Resultierende Frequenzdarstellung bei 2 mm Bedämpfungsabstand und 25°-Neigung; **links**: Sensor ohne Dichtungsring; **rechts:** Sensor mit Dichtungsring



Dichtungsring mit 247,4 kHz um ca. 70 kHz höher. Die maximal erzeugten Peaks sind weiterhin mit 42,3 kHz stärker vertreten (Tabelle 9). Die Tatsache, dass bei einer Neigung von 12° die Frequenzanhebung des Sensors ohne Dichtungsring höher gegenüber dem System mit Dichtungsring ausfällt, lässt sich mit einer spontan höheren Ansammlung von Wasser auf der Membran erklären. Als Schlussfolgerung lässt sich festhalten, dass eine Neigungsänderung den Masseneffekt des Wassers auf der Membran unabhängig vom Entfernen des Dichtungsrings nicht verhindert. Die unterschiedlichen Neigungen führen zu keinem Unterschied der Signale bezüglich ihres Verlaufes, ausgenommen von der genannten Frequenzanhebung (Abbildung 59).

	2 mm Abstand		
	25°-Neigung	12°-Neigung	
Frequenzanhebung ohne Dichtung [Hz]	61800	247400	
Frequenzanhebung mit Dichtung [Hz]	129600	177400	
Differenz der Frequenzanhebung [Hz]	-67800	70000	
Max. Peak ohne Dichtungsring [Hz]	48300	42300	
Max. Peak mit Dichtungsring [Hz]	26200	29800	
Differenz der max. Peaks [Hz]	22100	12500	

Tabelle 9: Vergleich der Frequenzanhebung und der maximalen Peak-Höhe mit einem Bedämpfungsabstand von 2 mm bei 12° und 25° Neigung

6.4.2 Vergleich der Messdaten bei 4 mm Abstand mit 12°- und 25°-Neigung:

Alle hier verwendeten Daten liegen den Messdaten der Tabelle 27 aus dem Anhang zugrunde. Bei einem Bedämpfungsabstand von 4 mm ist bezogen auf die Frequenzanhebung dieselbe Aussage zu tätigen wie bei einem Abstand von 2 mm. Die Frequenzanhebung ist ohne Dichtungsring 123,5 kHz kleiner als bei dem Sensor mit Dichtungsring (Tabelle 10). In diesem Versuch führen die einzelnen Tropfen bei dem Sensor mit Dichtungsring mit 43 kHz einen höheren tropfenverursachten Peak aus (Tabelle 10). Dies ist damit zu erklären, dass die Tropfen willkürliche Größen annehmen und sporadisch zu höheren Auslenkungen der Membran führen. Bei einer Neigung von 12° verzeichnet der Sensor ohne Dichtungsring mit einer Frequenzanhebung von 284 kHz eine um 99,6 kHz höhere Frequenz auf (Tabelle 10). In diesem Fall ist die Differenz der maximalen Peaks von 3,9 kHz vernachlässigbar gering. Dies kommt zustande, da die Tropfen in diesem Test nahezu dieselbe Große aufweisen. Die



höhere Frequenzanhebung des Sensors ohne Dichtungsring erklärt sich mit einer spontan höheren Ansammlung von Wasser auf der Membran.

Das Ergebnis dieses Vergleiches veranschaulicht, dass besonders bei einer Neigung von 12°, aber auch bei einer Neigung von 25°, unabhängig von der Art der Membraneinspannung eine Wasseransammlung nicht verhindert werden kann (Abbildung 60).



Abbildung 60: Resultierende Frequenzdarstellung bei 4 mm Bedämpfungsabstand und 25°-Neigung; **links:** Sensor ohne Dichtungsring; **rechts:** Sensor mit Dichtungsring

	4 mm Abstand			
	25°-Neigung	12°-Neigung		
Frequenzanhebung ohne Dichtung [Hz]	52100	284000		
Frequenzanhebung mit Dichtung [Hz]	175600	184400		
Differenz der Frequenzanhebung [Hz]	-123500	99600		
Max. Peak ohne Dichtungsring [Hz]	16000	23500		
Max. Peak mit Dichtungsring [Hz]	43000	27400		
Differenz der max. Peaks [Hz]	-27000	-3900		

Tabelle 10: Vergleich der Frequenzanhebung und der maximalen Peak-Höhe mit einem Bedämpfungsabstand von 4 mm bei 12° und 25° Neigung



7. Diskussion der Ergebnisse

Dieser Abschnitt berücksichtigt die Erkenntnisse der Zwischendiskussionen und die dazugehörigen Messergebnisse auf der Software- und Hardwareebene zur Erstellung einer Gesamtbewertung. Die Diskussion dient zur Verdeutlichung der zu empfehlenden Konfigurationen unter Berücksichtigung der Ergebnisse. Aufgrund der Chronologie der bisherigen Ausarbeitungen steht die Diskussion der Softwareanpassung an erster Stelle, worauf die Diskussionen zur Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration sowie der Gehäuseanpassung folgen.

7.1 Softwareoptimierung

Die Ergänzungen der Programme durch Hardware-Timer, Double- und Ring-Buffer, Mutex-Verfahren und Interrupts führen nicht zur Behebung der Peak-Problematik. Die Absicherung vor gleichzeitigem Lese- und Schreibzugriff unterdrückt nicht das Auftreten von Peaks.

Dies ist besonders bei Double- und Ring-Buffer, dem Mutex-Verfahren und bei der Interrupt-Methode der Fall, welche zur Behebung der Race Condition eingesetzt wurden. Die genannten Methoden dienen der Verhinderung der Race Condition, weshalb die Anpassung des Programmes bezogen auf seine zügige Bearbeitung im 10 ms-Takt berücksichtigt werden sollte. Aus diesem Grund ist die Nutzung eines Ring-Buffers im resultierenden Programm implementiert, damit die Effekte der Race Condition keine zukünftigen Problematiken erzeugen. Zudem lässt sich ein Ring-Buffer leicht in das vorhandene Programm einfügen.

Der Hardware-Timer ist ebenfalls im resultierenden Programm enthalten, da die Genauigkeit gegenüber einem Software-Timer größer ist (Abschnitt 3.2.5). So ist ein möglicher Zeitverzug bis zur Auslösung der Frequenzberechnung ausgeschlossen.

Das Mutex-Verfahren bietet die Möglichkeit, Aufgaben mit verschiedenen Prioritäten unabhängig voneinander auf unterschiedlichen Kernen auszuführen. Zur Messung der Frequenz sind die einzelnen Aufgaben voneinander abhängig. Das Auslösen des Sendeverfahrens mithilfe einer Aufgabe (Task) sperrt kurzzeitig die Verwendung einer Ressource, allerdings geschieht dies unabhängig davon, ob neue Daten vorhanden sind. Die erstellten Aufgaben werden in ihrem eigenen Zeitintervall unabhängig zum übrigen Programm ausgeführt, können aber nicht voneinander abhängig gemacht werden. Trotz dieser Tatsache ist die Übertragung von Daten möglich, da asynchron Daten zur Verfügung gestellt werden, was wiederum das unregelmäßige Auftreten von Peaks erklärt (Abbildung 38). Die alleinige Ausführung des Sendeverfahrens innerhalb einer Aufgabe (Task) verhindert nicht das Auftreten von Peaks.



Die Steuerung des Programmes mittels Interrupts verhindert nicht das Auftreten von Peaks. Da die Interrupt-Kaskade nicht auf den Impulszähler angewendet wird, sondern die Berechnung und das Senden in Interrupts ausgeführt werden, liegt die Annahme nahe, dass die Entstehung der Peaks nicht mit dem gleichzeitigen Lesen und Schreiben von Daten zusammenhängt.

Die Messungen zum Verhalten des Impulszählers zeigen, dass der Zählvorgang der Pulse durch die generelle Ausführung des Sendeverfahrens **ESP-NOW** in seiner Zählgeschwindigkeit beeinflusst wird. Der bisherige Zusammenhang zwischen ESP-NOW und dem Impulszähler besteht darin, dass beide Komponenten denselben Taktgeber verwenden und dadurch eine Beeinflussung des Verhaltens entsteht. Unabhängig der genauen Lokalisation der Fehlerquelle ist ein Konflikt zwischen dem Sendeverfahren ESP-NOW und Impulszähler nicht auf Softwareebene ausfindig zu machen. Die in den dem Optimierungsansatz getätigte These zur softwareseitigen Behebung der Peak-Entstehung kann somit nicht bestätigt werden (Abschnitt 4.1, These 1).



Abbildung 61: Darstellung des Sensoraufbaues mit einer Trennung von Mess- und Sendeverfahren durch zwei ESP32 Mikrocontrollern mit einer seriellen UART-Verbindung

Zuletzt kann das Verhalten durch die Trennung von Messung und Sendung über zwei Mikrocontrollern behoben werden (Abbildung 61). Die Maßnahme zeigt, dass die Messung ohne gleichzeitige Sendung der Daten störungsfrei durchgeführt wird. Dies ist möglich, da die gemessenen Frequenzen passiv vom zweiten Mikrocontroller über UART abgefragt werden und nicht in das laufende Programm eingegriffen wird. Das Ergebnis bekräftigt die Annahme, dass die Entstehung der Peaks im Zusammenhang zwischen der Koordination von ESP-NOW und dem Impulszähler liegt, welche wiederum durch die fehlerbehaftete Synchronisation der Kerne des Mikrocontrollers verursacht werden. Die Erfüllung eines stabilen und eindeutigen Messsignals mit einer Schwankung von ca. 100 Hz im unbedämpften Zustand sind mit der



Trennung von Mess- und Sendeverfahren gegeben. Mithilfe dieser Konfiguration kann ausgeschlossen werden, dass Messfehler aufgrund des Mikrocontrollers entstehen, und ist für die Messung von Frequenzen geeignet. Das resultierende Programm gestaltet sich wie in Abschnitt 5.1.6 angegeben mit der weiteren Verwendung eines Hardware-Timers und Ring-Buffers. Letztlich ist die Peak-Problematik behoben, auch wenn dies durch eine Hardwarelösung erreicht wurde.

7.2 Hardwareoptimierung

Nachfolgend sind die Bewertungen der Ergebnisse unterteilt in die Diskussionen über die Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration sowie der Gehäuseanpassung zur Masseneffektminimierung. Außerdem wird Stellung zu den formulierten Thesen des jeweiligen Themenfeldes genommen.

7.2.1 Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration

Die Entscheidung zur Wahl einer bestimmten Spulenkonfiguration ist zwangsläufig mit der Empfindlichkeitskonfiguration verknüpft. Die Höhe der Resonanzfrequenz und die Stabilität des Messsignals sind für die Erfüllung eins eindeutigen Ergebnisses in den Vordergrund zu stellen und beeinflussen die Wahl. Der Gesamtvergleich aller verwendeten Spulen verdeutlich



Abbildung 62: Darstellung der Resonanzfrequenzverläufe aller verwendeter Spulen (Spule α : 24 μ H; Spule γ : 6,3 μ H; Spule η : 5,3 μ H) und deren Kapazitätsanpassungen in Abhängigkeit des Abstandes



die Verbesserung gegenüber dem Ausgangszustand des Sensorsystems, welches bei der Firma Lambrecht meteo GmbH eingesetzt wurde.

Abbildung 62 stellt die abstandsabhängigen Resonanzfrequenzverläufe im Bereich von 0 – 6 mm dar und unterteilt das Diagramm in zwei Sektionen. Sektion I spiegelt alle möglichen Spulenkonfigurationen wider, welche Resonanzfrequenzen von über 10 MHz bei einem Abstand von 4 mm aufweisen. Sektion II stellt alle Konfigurationen dar, welche die Voraussetzung nicht erfüllen können. Mit dieser Eingrenzung entfallen sämtliche Konfigurationen der Spule γ und α . Der Unterschied der Spule α (Spule 24 µH, unterste Kurve) gegenüber der Spule η ist hervorzuheben, anhand dessen die These zur Empfindlichkeit des Sensors verifiziert wird (Abschnitt 4.2, These 2.). Vergleicht man die Resonanzfrequenzen zwischen 2 mm und 4 mm der Spule η mit 4 – 6 MHz deutlich größer (Tabelle 11).

	η (47	η (56	η (68	η (100		α (560
	pF)	pF)	pF)	pF)		pF)
f _{res} (2 mm) [MHz]	20,2115	18,1677	16,4581	14,3529	<i>f_{res}</i> (0 mm) [MHz]	3,0914
f _{res} (4 mm) [MHz]	13,8586	12,8210	11,70210	10,0250	f _{res} (2 mm) [MHz]	2,1389
E (2 mm) $[\frac{Hz}{0,1 \text{ mm}}]$	578.222	495.619	450.563	292.866	$E (2 mm) \left[\frac{Hz}{0,1 mm}\right]$	22.528

Tabelle 11: Resonanzfrequenzen bei 2 mm und 4 mm der Spulen α und η und die Empfindlichkeit E bei 2 mm Abstand

Die Empfindlichkeit *E* ist bei einem Abstand von 2 mm im Vergleich mindestens 13-fach kleiner gegenüber dieser der Spulen η (Tabelle 11). Dies macht deutlich, dass die Empfindlichkeit mit dem Anstieg der Resonanzfrequenz steigt und wesentlich die Empfindlichkeit des Systems beeinflusst.

Während der Darstellung der Messergebnisse sind in den Zwischendiskussionen Tendenzen aufgestellt worden, bei denen die Spulenkonfiguration der Spule γ mit einer Parallelkapazität von 150 pF und der Spule η mit einer Parallelkapazität von 68 pF hervorzuheben sind. Im Ausschlussverfahren sind beide Konfigurationen durch ein robustes und stabiles Messsignal in die Auswahl gekommen. Im direkten Vergleich zueinander weist die Spule η eine weitaus höhere Resonanzfrequenz im Bereich von 2 mm Bedämpfungsabstand auf. Zugunsten einer höheren Empfindlichkeit eignet sich die Spule η mit einer Parallelkapazität von 68 pF für die endgültige Nutzung als Sensor, welche zudem ein verlässliches und störungsunempfindliches



Messsignal erzeugt. Bei einem Abstand unterhalb von 2 mm könnte es zu einem Konflikt mit der Auslenkung der Membran kommen, da diese je nach Niederschlagsstärke in Kontakt mit der Spule gerät und die Messwerte verfälscht. Angesichts der baulichen Beschaffenheit wird ein Abstand zwischen 2 mm und 3 mm empfohlen, da dort die höchste Empfindlichkeit zwischen 115,143 kHz / 0,1 mm bis 450,563 kHz / 0,1 mm nachweisbar ist.

Die weitere These (Abschnitt 4.2, These 1) konnte anhand der Messergebnisse der Spulenkonfiguration nicht verifiziert werden. Jede Spule hat einen bestimmten Anpassungsbereich, bei der ein Optimum erreicht wird. Häufig ist es verknüpft mit einer hohen Güte. Die Messergebnisse zeigen auf, dass dies nicht immer der Fall ist, da Spule n bei einer niedrigeren Güte ein stabileres und empfindlicheres Verhalten vorweist. Grundsätzlich führt die Erhöhung der Parallelkapazität nicht zu einer Verbesserung und der Stabilität des Schwingkreises. Es lässt sich dennoch festhalten, dass eine Tendenz zu höheren Güten vorhanden ist, da sich vornehmlich die Spulen der Messreihen daran orientieren. Außerdem kann der Einfluss durch die Annäherung der Hand nicht mit einer Kapazitätserhöhung eliminiert werden. Der anfängliche Denkansatz dazu war, dass eine Erhöhung der Paralellkapazität die Wirkung weiterer äußerer Kapazitäten - wie die menschliche Hand verringert, da der Gesamteinfluss der Kapazitätsänderung verringert ist. Bei jeder Messung der Spulenkonfiguration ist eine Änderung der absoluten Resonanzfrequenz beobachtbar und scheint einer anderen Ursache zu entspringen, dessen Herkunft anderer Natur ist.

7.2.2 Gehäuseanpassung zur Masseneffektminimierung

Insgesamt wurden zwei Maßnahmen zur Minimierung des Masseneffektes ergriffen. Die Änderung des Ausrichtungswinkels führt zu einer allgemein besseren Ableitung von Wasser auf der Membran, was die aufgestellte These zur Verringerung der massenabhängigen Frequenzänderung verifiziert (Abschnitt 4.3, These 2). Bei einer niedrigeren Neigung von 12° macht die Art und Weise der Einspannung der Membran keinen wesentlichen Unterschied im Messergebnis aus. Diesbezüglich kann die 1. These (Abschnitt 4.3) nur teilweise verifiziert werden, da der Effekt des entfernten Dichtungsrings vornehmlich bei höherer Neigung wirkt. Es ist hervorzuheben, dass die gewählten Maßnahmen nicht zur Eliminierung des Masseneffektes, sondern zur Abschwächung geführt haben. Die Kraft der Tropfen, welche durch den Winkel um 10,3% (Abschnitt 5.2.1) niedriger auf die Abstandsänderung wirkt, zeigt keinen eklatanten Unterschied in der Aussagekraft der Peaks. Die Empfindlichkeit des Sensors in dem Bereich um 2 – 4 mm ist dem zur Folge groß genug, um diesen Verlust auszugleichen.

Verglichen zum bisherigen Aufbau des Sensors zeigen die Neigungserhöhung und der Wegfall des Dichtungsrings eine Verbesserung des Verhaltens auf und ist daher zu empfehlen. Eine



weitere Erhöhung der Neigung ist nicht zweckmäßig, da der Messbereich eine vertikale Einstellung einnimmt und vornehmlich seitlich auftreffende Tropfen detektiert. Daraus folgen eine Reduktion des gesamten Messbereiches und eine verminderte Detektion von Tropfen. Verglichen mit den Auswirkungen der Spulen- und Empfindlichkeitskonfiguration ist das Resultat der Gehäuseänderungen als gering einzuschätzen, da der Effekt der Masse des Wassers weiterhin vorhanden ist.



8. Zusammenfassung

Die Optimierungen des induktiven Wirbelstromsensors auf der Hard- und Softwareebene führt zu einem besseren Verständnis und Verhalten der konfigurierten Komponenten.

Besonders die Analyse der Spulenkonfiguration zeigt, dass eine geeignete Anpassung der Kapazität die Stabilität und Reproduzierbarkeit der Spule bedeutsam beeinflusst. Gleichzeitig hat diese Anpassung Einfluss auf die Empfindlichkeit. Gegenüber dem Messsystem, welches im Testlabor der Firma Lambrecht meteo GmbH verwendet wurde, ist die Empfindlichkeit mit 450 kHz pro 0,1 mm Abstandsänderung um ein Vielfaches gestiegen. Aufgrund der Auslenkung der Membran durch die Masse der Regentropfen und der Bauform der Spule ist ein Messabstand zwischen Spule und Membran von 2 mm bis 4 mm ideal.

Neben der Hardware trägt die Optimierung der Software einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Qualität und Aussagekraft des Messsignals bei. Mit der Eliminierung von extremen Frequenzschwankungen durch die Aufteilung der Aufgaben auf zwei Mikrocontrollern treten keine überproportionalen Frequenzerhöhungen auf, weshalb das Messsignal störungsfrei und eindeutig weiterverarbeitet werden kann.

Die Auswirkung von ansammelndem Wasser auf der Membran ist durch eine höhere Neigung von 25° und der Verwendung einer randlosen Membraneinspannung reduziert. Der Effekt der Masse des Wassers auf der Membran ist trotz der Maßnahmen vorhanden. Dennoch ist eine Verbesserung bei einer Neigung von 25° messbar.

Die äußeren kapazitiven Einflüsse – wie beispielsweise die Annäherung einer Hand – sind mit den Anpassungen der Kapazitäten nicht behoben. Die Ursache des Phänomens ist in der Bearbeitung dieser Arbeit nicht ergründet und Bedarf einer weiteren Analyse.

Mit den hier getätigten Anpassungen ist ein wesentlicher Grundstein für den Einsatz zur Detektion von Niederschlägen gelegt, sodass die gemessenen Daten auf Softwareebene weiterverarbeitet werden können, ohne die Plausibilität des Signals infrage zu stellen.



9. Ausblick

Wie in der Zusammenfassung angesprochen, sind die Effekte des ansammelnden Wassers reduziert und die Beeinflussung äußerer Kapazitäten weiterhin vorhanden. Ersterer Effekt tritt unentwegt auf, da eine Massenerhöhung durch das Wasser nicht aufhebbar ist. Eine zu starke Einspannung der Membran kann die Auslenkung durch einfallende Tropfen minimieren und reduziert die Empfindlichkeit des Sensors, da eine Abstandsänderung erforderlich ist. Vor diesem Hintergrund stellt eine Verarbeitung der Messdaten auf Softwareebene eine mögliche Lösung dar. Die interessierte Messgröße ist nicht die absolute Änderung der Frequenz, sondern die Frequenzerhöhung eines Tropfens ausgehend von seiner Grundfrequenz. Eine Möglichkeit, diesen Effekt zu unterdrücken, bietet der Einsatz eines Hochpasses auf Softwareebene, welcher einen langsamen und trägen Anstieg der Frequenz filtert. Dies hat die Folge, dass die absolute Grundfrequenz wenig bis keine Schwankungen vorweist. Gleichzeitig reduziert es durch dasselbe Prinzip die Auswirkung von äußeren kapazitiven Einflüssen. Da hauptsächlich mit der Verbesserung des diese Arbeit sich Messsignals der Frequenzrohdatenwerte beschäftigt, ist dies nicht in der Bearbeitung berücksichtigt worden. Dennoch kann der genannte Aspekt zukünftig zur Weiterentwicklung und Verbesserung des induktiven Wirbelstromniederschlagssensors im Rahmen des Forschungsprojekt KIWaSuS beitragen.



10. Literaturverzeichnis

- [1] Albach, M. (2017): "Induktivitäten in der Leistungselektronik Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften"; (S. F. GmbH, Hrsg.) Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [2] Batalla, Μ. (2021): "Entwicklung eines induktiven Low-Cost-Sensorsystems Messung Niederschlägen"; zur von Praxissemesterbericht, Hochschule Ruhr West, Messund Sensortechnik, Mülheim an der Ruhr.
- [3] Bödder, A. (2022): "Signalanalyse und -auswertung der Messdaten eines induktiven Niederschlagssensors". Bachelorarbeit, Hochschule Ruhr West, Mess- und Sensortechnik, Mülheim an der Ruhr.
- [4] Cimala, C. (2017): "Computergestützte Methoden zur Untersuchung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit induktiver Ladesysteme für Kraftfahrzeuge"; Dissertation, Bergischen Universität Wuppertal, Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik, Wuppertal; Abgerufen am 11. März 2022, 16:31 Uhr von http://elpub.bib.uniwuppertal.de/edocs/dokumente/fbe/elektrotechnik/diss2017/cimala/de1 705.pdf
- [5] Clemens, C. (15. Februar 2022): "Berechnungen zur Gegeninduktivität";Hochschule Ruhr West Mülheim an der Ruhr, NRW, Deutschland.
- [6] Electronics Tutorials: "Parallele Resonanzschaltung" (2022), Abgerufen am 16. April 2022, 15:58 Uhr von https://www.electronicstutorials.ws/de/actheorie/parallele-resonanzschaltung.html
- [7] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. (2021): "ESP32 Technical Reference Manual"; Abgerufen am 23. März 2022, 18:02 Uhr von https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_tech nical_reference_manual_en.pdf
- [8] Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd. (2022): "ESP-NOW"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 17:24 Uhr von https://www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview



- [9] Espres sif Systems (Shanghai) Co., Ltd. (2022): "Pulse Counter (PCNT)"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 16:25 Uhr von https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/apireference/peripherals/pcnt.html
- [10] extruder, FD3D GmbH: "TECHNISCHES DATENBLATT BioFusion".
 (2020); Abgerufen am 7. März 2022, 14:28 Uhr von https://www.extrudr.com/filerpool/download/datei/744/
- [11] Fließbach, T. (2012): "Elektrodynamik Lehrbuch zur Theoretischen Physik II" (6 Ausg.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [12] Heltec Automation (2021): "WiFi LoRa 32 (V2)"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 16:15 Uhr von https://heltec.org/project/wifi-lora-32/
- [13] Hochschule Ruhr West Mülheim an der Ruhr: "KIWaSuS" (2021); Abgerufen am 26. Februar 2022, 17:11 Uhr von http://www.hochschuleruhr-west.de/kiwasus/
- Keysight Technologies (2022): "4294A Precision Impedance Analyzer, 40 Hz to 110 MHz"; Abgerufen am 26. März 2022, 13:24 Uhr von keysight.com: https://www.keysight.com/de/de/product/4294A/precision-impedanceanalyzer-40-hz-to-110-mhz.html
- [15] kiwasus.de: "Hintergrund und Zielsetzung" (2021); Abgerufen am 26.
 Februar 2022, 17:46 Uhr von https://kiwasus.de/hintergrund-und-zielsetzung/
- [16] Kuch, T. (14. Mai 2019): "ESP32 Nutzung beider CPU Kerne für eigene Projekte"; Abgerufen am 20. Februar 2022, 18:06 Uhr von azdelivery.de: https://www.az-delivery.de/blogs/azdelivery-blog-furarduino-und-raspberry-pi/esp32-nutzung-beider-cpu-kerne-fuer-eigeneprojekte
- [17] Linear Technology Corporation. (2001): "LT1711/LT1712, Single/Dual 4.5ns, 3V/5V/±5V, Rail-to-Rail Comparators"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 15:43 Uhr von analog.com: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/171112f.pdf



- [18] Metall Ehrnsberger GbR. (2022): "Edelstahl Folie (1.4301) Stärke 0,2 mm"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 17:16 Uhr von metallstore24.de: https://metallstore24.de/edelstahl-folie-0,2-mm
- [19] Mohan, S. S., del Mar Hershenson, M., Boyd, S. P., & Lee, T. H. (1999):
 "Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances"; In *Vol. 34, No. 10, IEEE Journal of Solid-State Circuits* (S. 1419-1424).
- [20] Rohman GmbH: "Was ist Wirbelstromprüfung?". (2021); Abgerufen am
 25. November 2021, 18:10 Uhr von
 https://www.rohmann.de/faq/wirbelstrom-lexikon-wirbelstrompruefung/
- [21] TechTarget. (2022): "Race Condition"; Abgerufen am 25. März 2022, 08:23 Uhr von ComputerWeekly.de: https://www.computerweekly.com/de/definition/Race-Condition
- [22] Thorlabs, Inc. (Dezember 2016): "BSC202 and BSC203 Benchtop Stepper Motor Controller User Guide", HA0278T Rev H.; Abgerufen am 16. April 2022, 17:16 Uhr von https://www.manualslib.com/: https://www.manualslib.com/manual/1550711/Thorlabs-Bsc202.html#manual
- [23] Thorlabs, Inc. (2022): "Stepper Motor With Trapezoidal Drives 1" and 2" Travel"; Abgerufen am 16. April 2022, 17:04 Uhr von thorlabs.com: https://www.thorlabs.com/catalogpages/407.pdf
- [24] Tränkler, H., & Reindl, L. (2018): "Sensortechnik" (2 Ausg.), Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- [25] Universität Duisburg-Essen. (Januar 2011): ""Parallelschwingkreis". (F.
 f.-E. Elektrotechnik und Informationstechnik, Hrsg.); Abgerufen am 23.
 März 2022, 11:45 Uhr von https://www.ate.unidue.de/data/praktikum_et/praktikum/Parallelschwingkreis.pdf
- [26] Vyroubal, D. (4. April 2004): "Impedance of the Eddy-Current Displacement Probe: The Transformer Model"; In IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL. 53, No. 2 (S. 384-391).
- [27] Wang, Y., & Becker, W.-J. (1995): "Modellierung induktiver Sensoren bei Dämpfung mit Metallen"; In *Electrical Engineering 78* (S. 101-109).
 Springer-Verlag 1995.



- [28] Wikipedia. (10. August 2019): "Doppelpufferung"; Abgerufen am 25.
 März 2022, 08:41 Uhr von wikipedia.org: https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelpufferung
- [29] Wikipedia. (27. Oktober 2021): "FreeRTOS"; Abgerufen am 25. März
 2022, 09:21 Uhr von wikipedia.org: https://de.wikipedia.org/wiki/FreeRTOS
- [30] Wikipedia. (6. Dezember 2021): "Mutex"; Abgerufen am 25. März 2022,
 09:03 Uhr von wikipedia.org: https://de.wikipedia.org/wiki/Mutex
- [31] Wikipedia. (2. März 2021): "Semaphor (Informatik)"; Abgerufen am 25.
 März 2022, 08:55 Uhr von wikipedia.org: https://de.wikipedia.org/wiki/Semaphor_(Informatik)
- [32] Wikipedia. (22. März 2022): "Warteschlange (Datenstruktur)"; Abgerufen am 25. März 2022, 08:44 Uhr von wikipedia.org: https://de.wikipedia.org/wiki/Warteschlange_(Datenstruktur)#Ringpuffer
- [33] Würth Elektronik GmbH & Co. KG. (24. April 2017): "WE 760308100110 WE-WPCC Wireless Power Charging Transmitter Coil"; Abgerufen am 28. Februar 2022, 15:41 Uhr von we-online.com: https://www.weonline.com/catalog/datasheet/760308100110.pdf
- [34] Würth Elektronik GmbH & Co. KG. (6. April 2017): "WE 760308111 WE-WPCC Wireless Power Charging Transmitter Coil"; Abgerufen am 29. März 2022, 17:48 Uhr von we-online.de: https://www.weonline.com/katalog/datasheet/760308111.pdf
- [35] Würth Elektronik GmbH & Co. KG. (14. Mai 2018): "WE 760308101302
 WE-WPCC Wireless Power Transfer Transmitter Coil"; Abgerufen am 29. März 2022, 17:50 Uhr von we-online.com: https://www.we-online.com/katalog/datasheet/760308101302.pdf
- [36] Würth Elektronik GmbH & Co. KG. (2022): "WE-WPCC Wireless Power Transfer Transmitter Spule"; Abgerufen am 25. März 2022, 13:31 Uhr von we-online.de: https://www.we-online.com/katalog/de/WE-WPCC-TRANSMITTER



11. Anhang















Iteration (alle 10 ms)	Zeit Overflow – read_PCNT	Zeit read_PCNT - Overflow	Anzahl Overflows (multPulses)	Letzte Pulse	Differenz der Pulse zum Vorwert
1	5 ms	5 ms	1	27425	-
2	5 ms	5 ms	1	27072	- 353
3	5 ms	5 ms	1	27123	+ 51
4	5 ms	5 ms	1	27474	+ 351
5	5 ms	5 ms	1	27313	- 161
6	5 ms	5 ms	1	27123	- 190
7	5 ms	5 ms	1	26024	- 1099
8	5 ms	5 ms	1	27093	+ 1069
9	5 ms	5 ms	1	27377	+ 284
10	5 ms	5 ms	1	27359	- 18

[B] Zeitmessung mit Sendeverfahren ESP-NOW und Pulsdifferenz

- 15:40:45.526 -> Overflow Time: 193 ms
- 15:40:45.572 -> Read PCNT: 198 ms
- 15:40:45.572 -> 2802500
- 15:40:45.572 -> Pulse: 27425
- 15:40:45.572 -> multPulse: 1
- 15:40:45.572 -> Overflow Time: 203 ms
- 15:40:45.572 -> Read PCNT: 208 ms
- 15:40:45.572 -> 2830600
- 15:40:45.572 -> Pulse: 27072
- 15:40:45.572 -> multPulse: 1
- 15:40:45.572 -> Overflow Time: 213 ms
- 15:40:45.572 -> Read PCNT: 218 ms
- 15:40:45.572 -> 2864400
- 15:40:45.572 -> Pulse: 27123
- 15:40:45.572 -> multPulse: 1
- 15:40:45.572 -> Overflow Time: 223 ms



- 15:40:45.572 -> Read PCNT: 228 ms
- 15:40:45.572 -> 2878000
- 15:40:45.572 -> Pulse: 27474
- 15:40:45.572 -> multPulse: 1
- 15:40:45.572 -> Overflow Time: 233 ms
- 15:40:45.617 -> Read PCNT: 238 ms
- 15:40:45.617 -> 2871200
- 15:40:45.617 -> Pulse: 27313
- 15:40:45.617 -> multPulse: 1
- 15:40:45.617 -> Overflow Time: 243 ms
- 15:40:45.617 -> Read PCNT: 248 ms
- 15:40:45.617 -> 2853600
- 15:40:45.617 -> Pulse: 27123
- 15:40:45.617 -> multPulse: 1
- 15:40:45.617 -> Overflow Time: 253 ms
- 15:40:45.617 -> Read PCNT: 258 ms
- 15:40:45.617 -> 2856100
- 15:40:45.617 -> Pulse: 26024
- 15:40:45.617 -> multPulse: 1
- 15:40:45.617 -> Overflow Time: 263 ms
- 15:40:45.617 -> Read PCNT: 268 ms
- 15:40:45.617 -> 2873700
- 15:40:45.617 -> Pulse: 27093
- 15:40:45.617 -> multPulse: 1
- 15:40:45.617 -> Overflow Time: 273 ms
- 15:40:45.617 -> Read PCNT: 278 ms
- 15:40:45.617 -> 2865600
- 15:40:45.617 -> Pulse: 27377
- 15:40:45.617 -> multPulse: 1



15:40:45.617 -> Overflow Time: 283 ms

15:40:45.662 -> Read PCNT: 288 ms

15:40:45.662 -> 2856100

15:40:45.662 -> Pulse: 27359

15:40:45.662 -> multPulse: 1

15:40:45.662 -> Overflow Time: 293 ms

[C] Zeitmessung ohne Sendeverfahren ESP-NOW und Pulsdifferenz

Iteration (alle 10 ms)	Zeit Overflow – read_PCNT	Zeit read_PCNT - Overflow	Anzahl Overflows (multPulses)	Letzte Pulse	Differenz der Pulse zum Vorwert
1	4 ms	6 ms	1	26476	-
2	4 ms	6 ms	1	26474	- 2
3	4 ms	6 ms	1	26475	+ 1
4	4 ms	6 ms	1	26474	- 1
5	4 ms	6 ms	1	26474	0
6	4 ms	6 ms	1	26475	+1
7	4 ms	6 ms	1	26474	- 1
8	4 ms	6 ms	1	26474	0
9	4 ms	6 ms	1	26474	0
10	4 ms	6 ms	1	26474	0

- 15:34:24.599 -> Overflow Time: 22 ms
- 15:34:24.599 -> Read PCNT: 228 ms
- 15:34:24.599 -> 2823700
- 15:34:24.599 -> Pulse: 26476
- 15:34:24.599 -> multPulse: 1
- 15:34:24.599 -> Overflow Time: 234 ms
- 15:34:24.599 -> Read PCNT: 238 ms
- 15:34:24.599 -> 2823800
- 15:34:24.599 -> Pulse: 26474



- 15:34:24.599 -> multPulse: 1
- 15:34:24.599 -> Overflow Time: 244 ms
- 15:34:24.599 -> Read PCNT: 248 ms
- 15:34:24.599 -> 2823700
- 15:34:24.599 -> Pulse: 26475
- 15:34:24.599 -> multPulse: 1
- 15:34:24.599 -> Overflow Time: 254 ms
- 15:34:24.647 -> Read PCNT: 258 ms
- 15:34:24.647 -> 2823800
- 15:34:24.647 -> Pulse: 26474
- 15:34:24.647 -> multPulse: 1
- 15:34:24.647 -> Overflow Time: 264 ms
- 15:34:24.647 -> Read PCNT: 268 ms
- 15:34:24.647 -> 2823800
- 15:34:24.647 -> Pulse: 26474
- 15:34:24.647 -> multPulse: 1
- 15:34:24.647 -> Overflow Time: 274 ms
- 15:34:24.647 -> Read PCNT: 278 ms
- 15:34:24.647 -> 2823700
- 15:34:24.647 -> Pulse: 26475
- 15:34:24.647 -> multPulse: 1
- 15:34:24.647 -> Overflow Time: 284 ms
- 15:34:24.647 -> Read PCNT: 288 ms
- 15:34:24.647 -> 2823700
- 15:34:24.647 -> Pulse: 26474
- 15:34:24.647 -> multPulse: 1
- 15:34:24.647 -> Overflow Time: 294 ms
- 15:34:24.647 -> Read PCNT: 298 ms
- 15:34:24.647 -> 2823700


15:34:24.647 -> Pulse: 26474

15:34:24.647 -> multPulse: 1

15:34:24.689 -> Overflow Time: 304 ms

15:34:24.689 -> Read PCNT: 308 ms

15:34:24.689 -> 2823700

15:34:24.689 -> Pulse: 26474

15:34:24.689 -> multPulse: 1

15:34:24.689 -> Overflow Time: 314 ms

15:34:24.689 -> Read PCNT: 318 ms

15:34:24.689 -> 2823700

15:34:24.689 -> Pulse: 26474

15:34:24.689 -> multPulse: 1

15:34:24.689 -> Overflow Time: 324 ms

[D] Berechnung der durchschnittlichen Periodizität des Signals der Messung mit Sendeverfahren (Iteration 363 – 413)

 $(3,516+3,516+2,734+2,73+2,74+3,12+3,13+2,73+3,13+3,51+3,13+2,73+3,13+3,51) \ Hz$

 $\approx 3,1 Hz$

14





Abbildung 63: Messdaten von Spule α (100, 80, 60, 40 und 20 ml/min); 10 ml/min = 1mm



Abbildung 64: Periodogramm der Messung mit Sendeverfahren (Iteration 363 - 413) mit einer durchschnittlichen Periodizität von 3,1 Hz





Abbildung 66 Messignal von Spule α ohne Parallelkapazität bei einer Bedämpfung von 2 mm;



Abbildung 65: absolute Frequenzänderung bei Annäherung der Hand bei einem Spulen-Membran-Abstand von 4 mm (Spule α ohne Kapazitätsanpassung) (Aufnahme: 31-Mar-2022 17.31.43





Abbildung 67: Messignal von Spule γ ohne Parallelkapazität bei einer Bedämpfung von 2 mm; Messignal weist eine Häufung von überhohen Peaks auf (bis zu 24 kHz)





Abbildung 68: Messignal von Spule γ mit einer Parallelkapazität von 330 pF bei einer Bedämpfung von 2 mm; Messignal weist ein deutlich verrauschtes Signal auf mit einem maximalen Peak von 155,5 kHz auf



Abbildung 69: Messignal von Spule γ mit einer Parallelkapazität von 220 pF bei einer Bedämpfung von 2 mm; Messignal weist vereinzelte Peaks und Frequenzeinbrüche auf



Abbildung 70: Messsignal der Spule γ im unbedämpften Zustand; oben: 100 pF-Konfiguration; mitte: 150 pF-Konfiguration; unten: 220 pF-Konfiguration





Abbildung 71: Messsignal der Spule γ bei einer Bedämpfung mit 2 mm Abstand; oben: 100 pF-Konfiguration; unten: 150 pF-Konfiguration



Abbildung 72: Messsignal der Spule γ bei einer Bedämpfung mit 4 mm Abstand; oben: 100 pF-Konfiguration; mitte: 150 pF-Konfiguration; unten: 220 pF-Konfiguration



Abbildung 73: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: keine Anpassung; unten: 47 pF-Konfiguration



Abbildung 74: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: 56 pF-Konfiguration; mitte: 68 pF-Konfiguration; unten: 100 pF-Konfiguration



Abbildung 75: Messsignal der Spule η im unbedämpften Zustand; oben: 150 pF-Konfiguration; mitte: 220 pF-Konfiguration; unten: 330 pF-Konfiguration





Abbildung 76: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung; oben: Konfiguration ohne Anppassung (Auftreten von überproportionalen Peaks); unten: 330 pF-Konfiguration (Auftreten von überproportionalen Peaks bei einer 2 mm-Bedämpfung)





Abbildung 77: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung der Konfiguration mit 47 pF, 56 pF, 68 pF und 100 pF Parallelkapazitäten





Abbildung 78: Messsignal der Spule η mit 2 mm und 4 mm Bedämpfung; oben: 150 pF-Konfiguration; unten: 220 pF-Konfiguration





Abbildung 79: Tropfenmessung bei 2 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von 25° **ohne** Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 69





Abbildung 80: Tropfenmessung bei 2 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von 25° **mit** Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 69





Abbildung 81: Tropfenmessung bei 4 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von 25° **ohne** Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 71





Abbildung 82: Tropfenmessung bei 4 mm Spulen-Membran-Abstand bei einer Neigung von 25° **mit** Dichtungsring (Spule Eta 68 pF) von Seite 71

Tabellen:

330 pF	3,7827	334,011	0,21870	20,3400659	200	006
220 pF	4,527507	233,156	0,19991	19,7982522	300	006
150 pF	4,9817446	192,576	0,19057	38,7224121	200	300
100 pF	5,939259	135,488	0,17454	37,1624692	100	200
68 pF	6,803219	103,261	0,16308	36,8256127	100	100
56 pF	7,147791	93,545	0,15910	36,9652512	100	200
47 pF	7,531848	84,248	0,15499	36,6866669	400	600
1	11,52897	35,957	0,12527	39,9717774	2100	6800
Spule η (unbedämpft)	fres [MHz]	C [pF]	δ [mm]	ð	Max. Schwankung [Hz]	Frequenzänderung in 25 s [Hz]

Tabelle 12: Messergebnisse der Spule η im unbedämpften Zustand mit den Parallelkapazitäten 0 pF, 47 pF, 56, pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res: Resonanzfrequenz, C: Kapazität, δ : Eindringtiefe, Q: Güte



Tabelle 13: Messergebnisse der Spule η mit Bedämpfung (2 mm) und mit den Parallelkapazitäten 0 pF 47 pF, 56 pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res: Resonanzfrequenz, C: Kapazität



pF 330 pF	7507 3,7827	991 0,2187	300	00 3800	00 200	00 1600
220	6 4,527	0,19	40	18(20	34(
150 pF	4,981744	0,19057	600	6000	1300	1800
100 pF	5,939259	0,17454	500	2000	600	1000
68 pF	6,803219	0,16308	002	5200	200	200
56 pF	7,147791	0,15910	002	1800	002	1800
46 pF	7,531848	0,15499	400	1600	2500	800
	11,52897	0,12527	1000	5200	006	91400
Spule ŋ (4 mm Abstand)	f_{res} [MHz]	ð [mm]	Max. Schwankung [Hz]	Frequenzänderung in 25 s [Hz]	Max. Schwankung durch die Hand [Hz]	Frequenzerhöhung durch die Hand [Hz]

Tabelle 14: Messergebnisse der Spule η mit Bedämpfung (4 mm) und mit den Parallelkapazitäten 0 pF 47 pF, 56 pF, 68 pF, 100 pF, 150 pF, 220 pF und 300 pF; f_res: Resonanzfrequenz, C: Kapazität



	1 C 560 pF 4 4 FF	3,0383 1,433	8854E-11 4,9854E-10	0022238 0,00035263	,7817306 24,8498388	7,611086 3,89	0015418 0,00021567	5,573007 2,74	0018018 0,00025697	2200	22200	1100	0006	2200	3200	400	1500	400			drige					-							
	4 keit	ľ	2	0,0	20,		0'0	Ľ	0,0												nier	Ľ											
	24 µł	13020	4E-10	23231	15327	\$5649	.6871			000			2100	12500 15500					800		łe								12100	0500			
	330 pF	42 2 3	10 3,577	97 0,0002	43 16,097	.94 6,3	08 0,0001	- 21 -	- <mark>26</mark> .	00	- 00	- 00	00	00	- 00	- 00	- 00.	- 00	 00		n, störend	Leaks				-	- 00.	- 00	00	2 00.	- 00	- 00	000
	220 pF	1CTF(2 0	0 2,6232E	2 0,000214	3 15,60486	4 7,14	5 0,000155	5 5,71	8 0,000177		57	ő	2 58	2 0	242	5 C	0	2	 J 16	stabil mit	Artefakte	nınıkcı				_	2 27	0	25	<u>_</u>	D 42	E C	
	150 pF	4,23452	2,2212E-10	0,0002062.	21,886496	8,210524	0,0001484	6,298860	0,00016948	100	14600	1100	11200	60(390(50(350(500	20(i det	Iduit					1460	1100	11200	60(3900	500	J C D C
	0 pF	4,83018	L,6772E-10	,00019223	0,1387121	9,77117	,00013608	7,125225	,00015935	002	2800	1100	33500	600	1200	400	2000	500	300		abil,	20					2800	1100	33500	600	1200	400	0000
	n C 10	(),409405	3773E-12	00015564 0	6,1049205 2	14,60843	0 011129 0	11,38454	00012607 0	300	42200	7500	2700	27700	4500	600	4700	1000	1000		rende <mark>st</mark> i	2				-	42200	7500	2700	1600	4500	600	0027
L	μH H	l	77	o`	1		Ó		0												sto	2											
[pF 6,3	3,/82/	011E-10	0002187	400659	7,9356	,000151	5,905	0017504	000	4100	39000	2200	27200	1600	200	3800	300	006		ende	0					4100	39000	2200	2200	1600	200	UUO C
	330	2/JUC/2	6E-10 3,34	19991 0,0	82522 20,3	78102	13601 0	06406	16004 0,00	300	8100	800	31900	700	3400	500	1800	400	 006		störe	A Lake					8100	800	31900	700	3400	500	1 000
_	220 pl	r 40 2 224	E-10 2,331	9057 0,000	121 19,79	9000	3127 0,000	5158 7,	384 0,000	200	3300	1500	1900	500	1800	1300	0000	600	 300	_	ehr stabil,	n IIIac				-	3300	1500	1900	500	1800	1300	
	150 pF	1792'4 A	1,92576	54 0,00015	92 38,7224	26 10,50	21 0,00013	38 7,645	0,00015	00	0	0	11 00	00	00	00	00	00	 00	stabil,	leicht me					-	E 00	00	11 00	00	00	00	9
	100 pF	2,93922	1,35488E-1	0,0001745	37,162469	12,5212	0,0001202	9,2238	0,0001400	10	440	180	2370	120	100	90	200	20	20		stabil,	niiniiku					440	180	2370	120	100	90	200
	8 pF	0,803219	03261E-10	0,00016308	36,8256127	14,93846	0,00011005	10,600495),00013065	100	24300	1800	15600	1100	700	700	5200	700	100		ha statell		obei hier	öhere	essere Güte		24300	1800	15600	1100	700	700	5200
	pF 6	7,417,91	,3545E-11 1	00015910	5,9652512	15,51622	00010798 0	11,219463	00012699 (100	14400	2500	14300	1200	1800	700	1800	700	 200				3	Ξū	<u>م</u>		14400	2500	14300	1200	1800	700	1000
	pF 56	0 2401 240	4248E-11 9	00015499 0	,6866669 31	16,71588	00010404 0,	1,739921	00012414 0,	400	11700	3400	11900	006	800	2500	1600	400	 600			2 Allin					11700	3400	11900	006	800	2500	1600
_	n C 47	11,5289/	5957E-11 8,	00012527 0	,9717774 36	22,41703	0 0008984 0,0	19,9767	0)0009517	2100	91100	135600	269400	18300	91400	65400	5200	15900	 6800		rende					-	91100	1900	2400	1400	91400	006	5200
	kei	,	m	0'0	39		0,0		0'(0		[Hz]	,			[Hz]						stö	Ŭ				-	[Hz]				[Hz]		
	1	LZ]		<u>[</u>						moft) [Hz]	rch die Hand (2 mm)	e Hand (2 mm) [Hz]	mm) [Hz]	Hz]	rch die Hand (4 mm)	e Hand (4 mm) [Hz]	mm) [Hz]	Hz]	Hz]							rn	rch die Hand (2 mm)	e Hand (2 mm) [Hz]	mm) [Hz]	Hz]	rch die Hand (4 mm)	e Hand (4 mm) [Hz]	mm\[U=]
	the distance of the second	nbegampru) (ivi	ptt) [F]	e (unbedämpft)		mm) [MHz]	e (2 mm) [m]	mm) [MHz]	e (4 mm) [m]	nkung (unhedä	nzänderung du.	nkung durch die	inzänderung (2	nkung (2 mm) [inzänderung du	nkung durch die	inzänderung (4	nkung (4 mm) [derung in 25 s [i							vegen Ausreiße	inzänderung du	nkung durch die	inzänderung (2	nkung (2 mm) [inzänderung du	nkung durch die	A numbering (A
	Н Н	n) zuanba	(unbedäm	ndringtieh	üte	equenz (2	ndringtiefe	equenz (4	indringtief	Jax. Schwar	lax. Freque	lax. Schwai	lax. Freque	lax. Schwa	lax. Freque	lax. Schwai	lax. Freque	ax. Schwa	equenzänc			uner kung		nfehling		npassung v	lax. Freque	lax. Schwai	lax. Freque	ax. Schwa	lax. Freque	lax. Schwai	anna veh

Tabelle 15: Messergebnisse aller verwendeten Kombinationen zur Bestimmung einer geeigneten Spulenkonfiguration



XLII



					-			-
	α (560 pF)							
			Differenz					
		Empfindlichkeit	Empfindlichkeit	Selbstinduktivität	Gegeninduktivität	Gegeninduktivität	Frequenz	
Abstand [mm]	Frequenz Spule [Hz]	pro 0,1 mm [Hz]	[Hz]	L [H]	Spule [H]	Simulation [H]	Simulation [H]	Eindringtiefe [m]
0	3,091364E+06			5,3166E-06	1,86834E-05			0,000241925
0,1	3,043805E+06	47559,45		5,4841E-06	1,85159E-05			0,000243808
0,2	2,978723E+06	65081,35	-17521,90	5,7263E-06	1,82737E-05			0,000246457
0,3	2,898623E+06	80100,13	-15018,77	6,0472E-06	1,79528E-05			0,000249839
0,4	2,821026E+06	77597,00	2503,13	6,3844E-06	1,76156E-05			0,000253252
0,5	2,755945E+06	65081,35	12515,64	6,6895E-06	1,73105E-05			0,000256225
0,6	2,690864E+06	65081,35	0,00	7,0170E-06	1,69830E-05			0,000259305
0,7	2,620776E+06	70087,61	-5006,26	7,3974E-06	1,66026E-05			0,000262749
0,8	2,568210E+06	52565,71	17521,90	7,7033E-06	1,62967E-05			0,000265424
0,9	2,523154E+06	45056,32	7509,39	7,9809E-06	1,60191E-05			0,000267784
1	2,473091E+06	50062,58	-5006,26	8,3072E-06	1,56928E-05	1,50923E-05	2,3883E+06	0,000270481
1,1	2,438048E+06	35043,81	15018,77	8,5478E-06	1,54522E-05	1,50170E-05	2,3782E+06	0,000272418
1,2	2,394243E+06	43804,75	-8760,95	8,8634E-06	1,51366E-05	1,49424E-05	2,3684E+06	0,000274898
1,3	2,359199E+06	35043,81	8760,95	9,1287E-06	1,48713E-05	1,48685E-05	2,3588E+06	0,000276932
1,4	2,324155E+06	35043,80	0,00	9,4060E-06	1,45940E-05	1,47953E-05	2,3494E+06	0,000279012
1,5	2,286608E+06	37546,93	-2503,13	9,7175E-06	1,42825E-05	1,47227E-05	2,3402E+06	0,000281294
1,6	2,254068E+06	32540,68	5006,26	1,0000E-05	1,39999E-05	1,46508E-05	2,3312E+06	0,000283317
1,7	2,226533E+06	27534,42	5006,26	1,0249E-05	1,37511E-05	1,45795E-05	2,3224E+06	0,000285063
1,8	2,196496E+06	30037,55	-2503,13	1,0531E-05	1,34688E-05	1,45087E-05	2,3137E+06	0,000287006
1,9	2,161452E+06	35043,81	-5006,26	1,0875E-05	1,31246E-05	1,44386E-05	2,3052E+06	0,000289323
2	2,138924E+06	22528,16	12515,65	1,1106E-05	1,28943E-05	1,43690E-05	2,2969E+06	0,000290843

Tabelle 16: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 0 - 1 mm (Spule Alpha 560 pF)



	v (100 pE)					
	(100 pr)	Empfindlichke				
		it	Differenz			
		pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktiv	Gegenindukti	Eindringtiefe
Abstand [mm]	1 354193E+07	[HZ]	it [Hz]	Itat L [H] 8 235583F-07	VITAT M [H]	[m] 0.00011559
0,1	1,287860E+07	663329,16		9,105800E-07	5,389420E-06	0,00011853
0,2	1,240300E+07	475594,49	187734,67	9,817514E-07	5,318249E-06	0,00012078
0,3	1,196496E+07	438047,56	37546,93	1,054953E-06	5,245047E-06	0,00012297
0,4	1,152816E+07	436796,00	1251,56 86357.95	1,136411E-06	5,163589E-06	0,00012528
0,6	1,086483E+07	312891,11	37546,93	1,279409E-06	5,020591E-06	0,00012905
0,7	1,057071E+07	294117,65	18773,47	1,351595E-06	4,948405E-06	0,00013083
0,8	1,028285E+07	287859,83	6257,82	1,428328E-06	4,871672E-06	0,00013265
0,9	1,005131E+07	231539,42	-3754 69	1,494891E-06	4,805109E-06	0,00013417
1,1	9,640801E+06	175219,02	60075,09	1,624909E-06	4,675091E-06	0,00013577
1,2	9,446809E+06	193992,49	-18773,47	1,692330E-06	4,607670E-06	0,00013839
1,3	9,277847E+06	168961,20	25031,29	1,754530E-06	4,545470E-06	0,00013965
1,4	9,102628E+06	175219,02	-6257,82	1,822727E-06	4,477273E-06	0,00014098
1,5	8,964956E+06	156445.56	-18773.47	1,879139E-06	4,420861E-06	0,00014206
1,7	8,683354E+06	125156,45	31289,11	2,002997E-06	4,297003E-06	0,00014435
1,8	8,533166E+06	150187,73	-25031,29	2,074125E-06	4,225875E-06	0,00014561
1,9	8,433041E+06	100125,16	50062,58	2,123669E-06	4,176331E-06	0,00014648
2	8,312891E+06	120150,19	-20025,03	2,185502E-06	4,114498E-06	0,00014753
2,1	8,122653E+06	90112,64	10012,52	2,239113E-00	4,000883E-00	0,00014845
2,3	8,027534E+06	95118,90	-5006,26	2,343640E-06	3,956360E-06	0,00015013
2,4	7,942428E+06	85106,38	10012,52	2,394135E-06	3,905865E-06	0,00015093
2,5	7,837297E+06	105131,41	-20025,03	2,458797E-06	3,841203E-06	0,00015194
2,0	7,772213E+06	90112.64	-25031.29	2,500148E-06	3,740854E-06	0.00015258
2,8	7,617021E+06	65081,35	25031,29	2,603065E-06	3,696935E-06	0,00015412
2,9	7,536921E+06	80100,13	-15018,78	2,658688E-06	3,641312E-06	0,00015494
3	7,466834E+06	70087,61	10012,52	2,708834E-06	3,591166E-06	0,00015566
3,1	7,396746E+06	65081.35	5006.26	2,760412E-06	3,539588E-06	0,00015640
3,3	7,276596E+06	55068,84	10012,51	2,852324E-06	3,447676E-06	0,00015769
3,4	7,231539E+06	45056,32	10012,51	2,887977E-06	3,412023E-06	0,00015818
3,5	7,176471E+06	55068,84	-10012,51	2,932469E-06	3,367531E-06	0,00015878
3,6	7,121402E+06	55068,84 45056 32	10012 52	2,977997E-06	3,322003E-06	0,00015939
3,8	7.021277E+06	55068.84	-10012,52	3.063537E-06	3,285959E-00	0.00016053
3,9	6,986233E+06	35043,80	20025,03	3,094348E-06	3,205652E-06	0,00016093
4	6,931164E+06	55068,84	-20025,03	3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,1	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,2	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,4	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,5	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,6	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
4,/	6,931164E+06			3,143/13E-06	3,15628/E-06	0,00016157
4,8	6.931164E+06			3.143713E-00	3,156287E-06	0.00016157
5	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,1	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,2	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,3	6,931164E+06			3,143/13E-06	3,156287E-06	0,00016157
5.5	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,6	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,7	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,8	6,931164E+06			3,143713E-06	3,156287E-06	0,00016157
5,9	0,931164E+06			3,143/13E-06	3,156287E-06	0,00016157
0	0,0011040100	I	l	S, 4 - 5 / 13L-00	S,130207 L-00	0,00010107

Tabelle 17: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 0 - 4 mm (Spule Gamma 100 pF)



	γ (150 pF)	Empfindlichke				
		it	Differenz			
		pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktivi	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
Abstand [mm]	Frequenz Spule	[Hz]	it [Hz]	tät L [H]	ität M [H]	[m]
0	1,286358E+07			6,891587E-07	5,610841E-06	0,00011860
0,1	1,238798E+07	475594,49		7,430903E-07	5,556910E-06	0,00012085
0,2	1,179224E+07	595744,68	-120150,19	8,200688E-07	5,479931E-06	0,00012387
0,3	1,123655E+07	555694,62	40050,06	9,031862E-07	5,396814E-06	0,00012689
0,4	1,076721E+07	409330,07	48811.01	9,836410E-07	5,310359E-06	0,00012963
0,6	1.005257E+07	294117.65	126408.01	1,128468E-06	5,171532E-06	0.00013416
0,7	9,703379E+06	349186,48	-55068,84	1,211147E-06	5,088853E-06	0,00013655
0,8	9,443054E+06	260325,41	88861,08	1,278845E-06	5,021155E-06	0,00013842
0,9	9,157697E+06	285356,70	-25031,29	1,359785E-06	4,940215E-06	0,00014056
1	8,947434E+06	210262,83	75093,87	1,424446E-06	4,875554E-06	0,00014220
1,1	8,727159E+06	220275,34	-10012,52	1,497260E-06	4,802740E-06	0,00014399
1,2	8,546934E+06	180225,28	40050,06	1,561070E-06	4,738930E-06	0,00014550
1,3	8,371713L+00	165206 51	10012 52	1,027099E-00	4,072901E-00	0,00014701
1.5	8,038798E+06	167709,64	-2503,13	1,764658E-06	4,535342E-06	0,00015002
1,6	7,903630E+06	135168,96	32540,68	1,825533E-06	4,474467E-06	0,00015130
1,7	7,768461E+06	135168,96	0,00	1,889613E-06	4,410387E-06	0,00015261
1,8	7,648310E+06	120150,19	15018,77	1,949449E-06	4,350551E-06	0,00015381
1,9	7,533166E+06	115143,93	5006,26	2,009499E-06	4,290501E-06	0,00015498
2	7,418023E+06	115143,93	0,00	2,072367E-06	4,227633E-06	0,00015618
2,1	7,317897E+06	100125,16	15018,77	2,129464E-06	4,170536E-06	0,00015724
2,2	7,127660F+06	90112.64	10012.52	2,188954E-00	4,055348F-06	0.00015932
2,4	7,032541E+06	95118,90	-5006,26	2,305783E-06	3,994217E-06	0,00016040
2,5	6,942428E+06	90112,64	5006,26	2,366029E-06	3,933971E-06	0,00016144
2,6	6,872340E+06	70087,61	20025,03	2,414535E-06	3,885465E-06	0,00016226
2,7	6,807259E+06	65081,35	5006,26	2,460925E-06	3,839075E-06	0,00016303
2,8	6,732165E+06	75093,87	-10012,51	2,516132E-06	3,783868E-06	0,00016394
2,9	6,662078E+06	70087,61	5006,26	2,569352E-06	3,/30648E-06	0,00016480
3.1	6.531915E+06	60075.09	10012.52	2,024278L-00	3,627228E-06	0.00016567
3,2	6,486859E+06	45056,32	15018,77	2,710030E-06	3,589970E-06	0,00016701
3,3	6,416771E+06	70087,61	-25031,29	2,769554E-06	3,530446E-06	0,00016792
3,4	6,376721E+06	40050,06	30037,55	2,804453E-06	3,495547E-06	0,00016844
3,5	6,316646E+06	60075,09	-20025,03	2,858050E-06	3,441950E-06	0,00016924
3,6	6,271589E+06	45056,32	15018,77	2,899263E-06	3,400737E-06	0,00016985
3,/	6,221527E+06	50062,58	-5006,26	2,946110E-06	3,353890E-06	0,00017053
3,0	6.131414F+06	50062.58	-10012,51	2,984410E-00	3,266656F-06	0.00017178
4	6,086358E+06	45056,32	5006,26	3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,1	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,2	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,3	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,4	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,5	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,0	6.086358E+06	0,00		3.078420E-00	3,221580E-00	0.00017242
4,8	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
4,9	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,1	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,2	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,3	0,080358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,4	6.086358F+06	0,00		3.078420E-06	3,221580E-06	0.00017242
5,5	6,086358E+06	0.00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,7	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,8	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
5,9	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242
6	6,086358E+06	0,00		3,078420E-06	3,221580E-06	0,00017242

Tabelle 18: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 0 - 4 mm (Spule Gamma 150 pF)



	v (220 pF)					
		Empfindlichke				
		it	Differenz			
		pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktiv	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
Abstand [mm]	Frequenz Spule	[Hz]	it [Hz]	ität L [H]	ität M [H]	[m]
0	1,023905E+07			9,210733E-07	5,378927E-06	0,00013293
0,1	9,798498E+06	440550,69		1,005760E-06	5,294240E-06	0,00013589
0,2	9,387985E+06	410513,14	30037,55	1,095642E-06	5,204358E-06	0,00013883
0,3	9,077597E+06	310387,99	100125,16	1,1/1849E-06	5,128151E-06	0,00014118
0,4	8,787234E+06	290362,95	20025,03	1,250573E-06	5,049427E-06	0,00014349
0,5	8,300884E+00	250330,44	30037 55	1,334338E-00	4,903042E-00	0,00014384
0,7	8.026283E+06	230287.86	20025.03	1.498941E-06	4,801059E-06	0.00015014
0,8	7,813517E+06	212765,96	17521,90	1,581686E-06	4,718314E-06	0,00015217
0,9	7,653317E+06	160200,25	52565,71	1,648595E-06	4,651405E-06	0,00015376
1	7,503129E+06	150187,73	10012,52	1,715255E-06	4,584745E-06	0,00015529
1,1	7,327910E+06	175219,02	-25031,29	1,798263E-06	4,501737E-06	0,00015713
1,2	7,202753E+06	125156,45	50062,58	1,861300E-06	4,438700E-06	0,00015849
1,3	7,057572E+06	145181,48	-20025,03	1,938665E-06	4,361335E-06	0,00016011
1,4	6,917397E+06	140175,22	5006,26	2,018032E-06	4,281968E-06	0,00016173
1,5	0,81/2/2E+06	110125,16	40050,06	2,0///45E-06	4,222255E-06	0,00016424
1,0	6,707134E+06	100125 16	-10012,51	2,140542E-00	4,153458E-06	0,00016424
1,7	6 506884F+06	100125,10	10012,32	2,212094E-00	4,087900E-00	0,00010548
1,9	6.416771E+06	90112.64	10012.51	2.345202E-06	3.954798E-06	0.00016792
2	6,336671E+06	80100,13	10012,52	2,404867E-06	3,895133E-06	0,00016898
2,1	6,251564E+06	85106,38	-5006,26	2,470791E-06	3,829209E-06	0,00017012
2,2	6,176471E+06	75093,87	10012,51	2,531236E-06	3,768764E-06	0,00017115
2,3	6,107635E+06	68836,05	6257,82	2,588614E-06	3,711386E-06	0,00017212
2,4	6,037547E+06	70087,61	-1251,56	2,649063E-06	3,650937E-06	0,00017311
2,5	5,967459E+06	70087,61	0,00	2,711655E-06	3,588345E-06	0,00017413
2,6	5,91/39/E+06	50062,58	20025,03	2,757732E-06	3,542268E-06	0,00017486
2,7	5,85/322E+06	60075,09	-10012,52	2,814591E-06	3,485409E-06	0,00017575
2,8	5,732240E+00	55068.84	10012 52	2,878135E-00	3,421805E-00	0,00017759
3	5,692115E+06	45056,32	10012,52	2,980342E-06	3,319658E-06	0,00017829
3,1	5,642053E+06	50062,58	-5006,26	3,033466E-06	3,266534E-06	0,00017908
3,2	5,596996E+06	45056,32	5006,26	3,082502E-06	3,217498E-06	0,00017980
3,3	5,546934E+06	50062,58	-5006,26	3,138394E-06	3,161606E-06	0,00018060
3,4	5,506884E+06	40050,06	10012,52	3,184209E-06	3,115791E-06	0,00018126
3,5	5,473091E+06	33792,24	6257,82	3,223651E-06	3,076349E-06	0,00018182
3,6	5,423029E+06	50062,58	-16270,34	3,283444E-06	3,016556E-06	0,00018266
3,/	5,38/985E+06	35043,81	15018,77	3,326294E-06	2,973706E-06	0,00018325
3,0	5,352941E+06	35043,80	0,00	3,369989E-06	2,930011E-06	0,00018385
4	5.277847E+06	40050.06	-5006.26	3.466568E-06	2,833432E-06	0.00018515
4,1	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,2	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,3	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,4	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,5	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,6	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,7	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,8	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
4,9	5,277847E+06			3,400508E-00	2,833432E-06	0,00018515
5 1	5.277847E+06			3,400308E-00	2,033432E-00	0.00018515
5.2	5.277847E+06			3.466568E-06	2.833432E-06	0.00018515
5.3	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,4	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,5	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,6	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,7	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,8	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
5,9	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515
6	5,277847E+06			3,466568E-06	2,833432E-06	0,00018515

Tabelle 19: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 0 - 4 mm (Spule Gamma 220 pF)



	n (47 pF)	8.4248E-11		(H)	(H)	[m]
		Empfindlichke				
		it	Differenz			
Abstand [mm]	Frequenz Spule	pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktivi	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
	2,021151E+07	[112]	1 [12]	7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,1	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,2	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,3	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,4	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,5	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,7	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,8	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
0,9	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,1	2.021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0.000094614
1,3	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,4	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,5	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,6	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,7	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
1,9	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
2	2,021151E+07			7,360058E-07	4,563994E-06	0,000094614
2,1	1,963329E+07	578222,78		7,799966E-07	4,520003E-06	0,000095997
2,2	1,907635E+07	556946,18	21276,60	8,262065E-07	4,473793E-06	0,000097389
2,3	1,852065E+07	555694,62	1251,56	8,765294E-07	4,423471E-06	0,000098839
2,4	1,801377E+07	403003 75	103879.85	9,205522E-07	4,373448E-06	0,000100220
2,6	1,723780E+07	372966,21	30037,55	1,011848E-06	4,288152E-06	0,000102451
2,7	1,685106E+07	386733,42	-13767,21	1,058825E-06	4,241175E-06	0,000103620
2,8	1,653567E+07	315394,24	71339,17	1,099602E-06	4,200398E-06	0,000104603
2,9	1,622653E+07	309136,42	6257,82	1,141898E-06	4,158102E-06	0,000105595
31	1,593116E+07	295369,21	27534.42	1,184633E-06	4,115367E-06	0,000106569
3,2	1,540551E+07	257822,28	10012,52	1,266855E-06	4,033145E-06	0,000108372
3,3	1,518148E+07	224030,04	33792,24	1,304521E-06	3,995479E-06	0,000109169
3,4	1,493617E+07	245306,63	-21276,60	1,347722E-06	3,952278E-06	0,000110062
3,5	1,474343E+07	192740,93	52565,71	1,383190E-06	3,916810E-06	0,000110779
3,6	1,4565/1E+0/	206508.14	-28785.08	1,41/150E-06	3,882850E-06	0,000111453
3.8	1.417897E+07	180225.28	26282.85	1,495510E-06	3,841795E-00	0.000112251
3,9	1,399875E+07	180225,28	0,00	1,534266E-06	3,765734E-06	0,000113687
4	1,385857E+07	140175,22	40050,06	1,565460E-06	3,734540E-06	0,000114261
4,1	1,371840E+07	140175,22	0,00	1,597615E-06	3,702385E-06	0,000114843
4,2	1,357572E+07	142678,35	-2503,13	1,631373E-06	3,668627E-06	0,000115445
4,5	1,341802E+07	137097,12	26282.85	1,009944E-00	3,596859E-06	0.000116694
4,5	1,315394E+07	132665,83	-1251,56	1,737669E-06	3,562331E-06	0,000117281
4,6	1,303880E+07	115143,93	17521,90	1,768495E-06	3,531505E-06	0,000117798
4,7	1,291364E+07	125156,45	-10012,52	1,802941E-06	3,497059E-06	0,000118367
4,8	1,280851E+07	105131,41	20025,03	1,832659E-06	3,467341E-06	0,000118852
4,9	1,272090E+07	110137 67	-22528.16	1,857989E-06	3,442011E-06	0,000119261
5,1	1,252065E+07	90112,64	20025,03	1,917896E-06	3,382104E-06	0,000120211
5,2	1,242553E+07	95118,90	-5006,26	1,947372E-06	3,352628E-06	0,000120670
5,3	1,234168E+07	83854,82	11264,08	1,973925E-06	3,326075E-06	0,000121079
5,4	1,224656E+07	95118,90	-11264,08	2,004707E-06	3,295293E-06	0,000121548
5,5	1,210896E+07	82603 25	1/521,90 -5006.26	2,030355E-06	3,209045E-06	0,000121935
5,0	1,200375E+07	82603.25	0.00	2,086627E-06	3,213373E-06	0,000122771
5,8	1,193367E+07	70087,61	12515,65	2,111209E-06	3,188791E-06	0,000123131
5,9	1,187860E+07	55068,84	15018,77	2,130829E-06	3,169171E-06	0,000123417
6	1,180100E+07	77597,00	-22528,16	2,158943E-06	3,141057E-06	0,000123822

Tabelle 20: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 47 pF)



		0.055.44		6.0	ful)	[m]
	η (56 pF)	9,35E-11 Empfindlichke		[H]	[H]	[m]
		it	Differenz			
		pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktivi	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
Abstand [mm]	Frequenz Spule	[Hz]	it [Hz]	tät L [H]	ität Spule [H]	[m]
0	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,1	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,2	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,3	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,4	1.816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0.000099794
0,6	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,7	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,8	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
0,9	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,1	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,2	1,816771E+0/			8,2038/8E-0/	4,4/9612E-06	0,000099794
1,3	1.816771F+07			8,203878F-07	4,479612E-06	0.000099794
1,4	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,6	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,7	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,8	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
1,9	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
2	1,816771E+07			8,203878E-07	4,479612E-06	0,000099794
2,1	1,767209E+07	495619,52	26205.27	8,670492E-07	4,432951E-06	0,000101184
2,2	1,721277E+07	459324,16	36295,37	9,139412E-07	4,386059E-06	0,000102525
2,3	1,640050F+07	382978.72	46307,88	1.006712F-06	4,293288F-06	0.000105033
2,5	1,603630E+07	364205,26	18773,47	1,052959E-06	4,247041E-06	0,000106219
2,6	1,571965E+07	316645,81	47559,45	1,095806E-06	4,204194E-06	0,000107284
2,7	1,540801E+07	311639,55	5006,26	1,140582E-06	4,159418E-06	0,000108363
2,8	1,512641E+07	281602,00	30037,55	1,183445E-06	4,116555E-06	0,000109367
2,9	1,485232E+07	274092,62	7509,39	1,227528E-06	4,072472E-06	0,000110372
3	1,459950E+07	252816,02	21276,60	1,270409E-06	4,029591E-06	0,000111324
3,1	1,438548E+07	214017,52	38/98,50	1,308491E-06	3,991509E-06	0,000112149
3,2	1,413043L+07	229030,30	26282.85	1,390725E-06	3,948827E-00	0.000113032
3,4	1,376596E+07	187734,67	15018,77	1,428916E-06	3,871084E-06	0,000114644
3,5	1,357697E+07	188986,23	-1251,57	1,468973E-06	3,831027E-06	0,000115440
3,6	1,341927E+07	157697,12	31289,11	1,503701E-06	3,796299E-06	0,000116116
3,7	1,326909E+07	150187,74	7509,39	1,537933E-06	3,762067E-06	0,000116771
3,8	1,309637E+07	172715,90	-22528,16	1,578766E-06	3,721234E-06	0,000117539
3,9	1,294618E+07	150187,73	22528,16	1,615608E-06	3,684392E-06	0,000118218
4	1,282103E+07	157607 12	-25031,29	1,04/305E-06	3,052095E-06	0,000118794
4,1	1,255069E+07	112640.80	45056.32	1,719034E-06	3,580966E-06	0,000120067
4,3	1,243179E+07	118898,62	-6257,82	1,752073E-06	3,547927E-06	0,000120639
4,4	1,231915E+07	112640,80	6257,82	1,784260E-06	3,515740E-06	0,000121190
4,5	1,221652E+07	102628,29	10012,52	1,814364E-06	3,485636E-06	0,000121698
4,6	1,211139E+07	105131,41	-2503,13	1,846000E-06	3,454000E-06	0,000122225
4,7	1,200375E+07	107634,54	-2503,13	1,879253E-06	3,420747E-06	0,000122771
4,8	1,190363E+07	100125,16	7509,39	1,911000E-06	3,389000E-06	0,000123287
4,9	1,180734E+07	71420.10	24869.44	1,942296E-06	3,337704E-00	0,000123788
51	1,163830E+07	97622.03	-26201.93	1,999128E-06	3,300872E-06	0,000124105
5,2	1,156320E+07	75093,87	22528,16	2,025178E-06	3,274822E-06	0,000125088
5,3	1,146934E+07	93867,33	-18773,47	2,058462E-06	3,241538E-06	0,000125599
5,4	1,139925E+07	70087,61	23779,72	2,083853E-06	3,216147E-06	0,000125985
5,5	1,133667E+07	62578,22	7509,39	2,106922E-06	3,193078E-06	0,000126332
5,6	1,126408E+07	72590,74	-10012,52	2,134166E-06	3,165834E-06	0,000126738
5,7	1,119399E+07	/0087,61	2503,13	2,160974E-06	3,139026E-06	0,000127135
5,8	1,105882F+07	57571 07	20025 02	2,191248E-06	3.085877F-06	0,000127578
6	1,099625E+07	62578,22	-5006,26	2,239395E-06	3,060605E-06	0,000128273

Tabelle 21: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 56 pF)



	η (68 pF)	Empfindlich				
		keit	Differenz		Gegenindukt	
		pro 0,1 mm	Empfindlich	Selbstinduktiv	ivität Spule	Eindringtiefe
Abstand [mm]	Frequenz Spule	[Hz]	keit [Hz]	ität L [H]	[H]	[m]
0.1	1,645807E+07			9,056217E-07 9.056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,2	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,3	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,4	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,5	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,7	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,8	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
0,9	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1,1	1.645807E+07			9,030217E-07	4,39438E-00	0.000104850
1,3	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1,4	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1,5	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1,6	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
1,7	1,045807E+07			9,056217E-07	4,39438E-00	0,000104850
1,9	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
2	1,645807E+07			9,056217E-07	4,39438E-06	0,000104850
2,1	1,600751E+07	450563,20		9,573202E-07	4,34268E-06	0,000106315
2,2	1,557697E+07	430538,17	20025,03	1,010971E-06	4,28903E-06	0,000107774
2,3	1,522653E+07	350438,05	80100,13	1,058042E-06	4,24196E-06	0,000109007
2,5	1,458323E+07	302878,60	37546,93	1,153446E-06	4,14655E-06	0,000110247
2,6	1,429787E+07	285356,70	17521,90	1,199947E-06	4,10005E-06	0,000112492
2,7	1,403755E+07	260325,41	25031,29	1,244865E-06	4,05513E-06	0,000113530
2,8	1,378223E+07	255319,15	5006,26	1,291415E-06	4,00858E-06	0,000114577
2,9	1,351690E+07	265331,67	35043.81	1,342613E-06	3,95739E-06	0,000115696
3,1	1,308636E+07	200250,31	30037,55	1,432409E-06	3,86759E-06	0,000117584
3,2	1,287860E+07	207759,70	-7509,39	1,478998E-06	3,82100E-06	0,000118528
3,3	1,269837E+07	180225,28	27534,42	1,521278E-06	3,77872E-06	0,000119366
3,4	1,255319E+07	145181,48	35043,80	1,556670E-06	3,74333E-06	0,000120055
3,5	1,238298E+07	135168.96	-25031,29	1,599759E-06	3,70024E-06	0,000120877
3,7	1,209762E+07	150187,73	-15018,77	1,676119E-06	3,62388E-06	0,000122294
3,8	1,195244E+07	145181,48	5006,26	1,717084E-06	3,58292E-06	0,000123035
3,9	1,181727E+07	135168,96	10012,51	1,756590E-06	3,54341E-06	0,000123736
4	1,170213E+07	115143,93	20025,03	1,791328E-06	3,50867E-06	0,000124344
4,1	1,138098E+07	115143,93	0,00	1,827107E-06	3,47289E-06	0,000124980
4,3	1,137171E+07	100125,16	15018,77	1,896937E-06	3,40306E-06	0,000126137
4,4	1,125657E+07	115143,93	-15018,77	1,935943E-06	3,36406E-06	0,000126781
4,5	1,115895E+07	97622,03	17521,90	1,969964E-06	3,33004E-06	0,000127334
4,6	1,105882E+07	75093.87	-2503,13	2,005797E-06	3,29420E-06	0,000127909
4,8	1,089362E+07	90112,64	-15018,77	2,067096E-06	3,23290E-06	0,000128875
4,9	1,080350E+07	90112,64	0,00	2,101723E-06	3,19828E-06	0,000129412
5	1,074343E+07	60075,09	30037,55	2,125293E-06	3,17471E-06	0,000129773
5,1	1,065832E+07	85106,38	-25031,29	2,159370E-06	3,14063E-06	0,000130290
5,2	1,05/822E+0/	80100,13 70087.61	5006,26	2,192196E-06	3,10/80E-06	0,000130783
5,3	1,044305E+07	65081.35	5006.26	2,249312E-06	3,05069E-06	0,000131626
5,5	1,038298E+07	60075,09	5006,26	2,275416E-06	3,02458E-06	0,000132006
5,6	1,031790E+07	65081,35	-5006,26	2,304212E-06	2,99579E-06	0,000132422
5,7	1,025782E+07	60075,09	5006,26	2,331280E-06	2,96872E-06	0,000132809
5,8	1,025/82E+07	0,00	60075,09	2,331280E-06	2,968/2E-06	0,000132809
5,9	1,025782E+07	0,00	0,00	2,331280E-06	2,96872E-06	0,000132809
U		. ,				-

Tabelle 22: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 68 pF)



	n (100 nE)					
		Empfindlichke				
		it pro 0 1 mm	Differenz Empfindlichko	Solbetinduktivi	Cogoninduktiv	Eindringtiofo
Abstand [mm]	Frequenz Spule	[Hz]	it [Hz]	tät L [H]	ität Spule [H]	[m]
0	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,1	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,2	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,3	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,4	1.435294E+07			9.075250E-07	4,392475E-06	0.00011228
0,6	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,7	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,8	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
0,9	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
11	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,1	1.435294E+07			9.075250E-07	4.392475E-06	0.00011228
1,3	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,4	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,5	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,6	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,/	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
1,0	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
2	1,435294E+07			9,075250E-07	4,392475E-06	0,00011228
2,1	1,392741E+07	425531,91		9,638284E-07	4,336172E-06	0,00011398
2,2	1,355695E+07	370463,08	55068,84	1,017224E-06	4,282776E-06	0,00011552
2,3	1,323655E+07	320400,50	50062,58	1,067065E-06	4,232935E-06	0,00011691
2,4	1,291740E+07	319148,94	1251,56	1,120445E-06	4,179555E-06	0,00011835
2,5	1,262203E+07	295369,21	23//9,/2	1,1/349/E-06	4,126503E-06	0,00011973
2,0	1.212516E+07	225281.60	46307.88	1,223676E 00	4.028356E-06	0.00012216
2,8	1,187359E+07	251564,46	-26282,85	1,326100E-06	3,973900E-06	0,00012344
2,9	1,167459E+07	198998,75	52565,71	1,371693E-06	3,928307E-06	0,00012449
3	1,145682E+07	217772,22	-18773,47	1,424335E-06	3,875665E-06	0,00012567
3,1	1,127284E+07	183979,98	33792,24	1,471206E-06	3,828794E-06	0,00012669
3,2	1,111139E+07	161451,81	22528,16	1,514271E-06	3,785729E-06	0,00012761
3,3	1.079099E+07	155193.99	10012.52	1.605528E-06	3.694472E-06	0.00012949
3,5	1,064080E+07	150187,73	5006,26	1,651170E-06	3,648830E-06	0,00013040
3,6	1,050188E+07	138923,65	11264,08	1,695144E-06	3,604856E-06	0,00013126
3,7	1,038924E+07	112640,80	26282,85	1,732101E-06	3,567899E-06	0,00013197
3,8	1,025407E+07	135168,96	-22528,16	1,778067E-06	3,521933E-06	0,00013283
3,9	1,013392E+07	120150,19	15018,77	1,820479E-06	3,479521E-06	0,00013362
4 1	9.904881F+06	120150.19	-11264.08	1,800240E-00	3,439700E-00	0.00013434
4,2	9,818523E+06	86357,95	33792,24	1,939314E-06	3,360686E-06	0,00013575
4,3	9,715895E+06	102628,28	-16270,34	1,980500E-06	3,319500E-06	0,00013646
4,4	9,622028E+06	93867,34	8760,95	2,019330E-06	3,280670E-06	0,00013713
4,5	9,550688E+06	71339,17	22528,16	2,049609E-06	3,250391E-06	0,00013764
4,6	9,464330E+06	86357,95	-15018,77	2,08/183E-06	3,21281/E-06	0,00013826
4,7	9,381727E+06	90112.64	-7509.39	2,124099E-06	3,175901E-06	0.00013887
4,9	9,227785E+06	63829,79	26282,85	2,195561E-06	3,104439E-06	0,00014003
5	9,152691E+06	75093,87	-11264,08	2,231736E-06	3,068264E-06	0,00014060
5,1	9,077597E+06	75093,87	0,00	2,268812E-06	3,031188E-06	0,00014118
5,2	9,025031E+06	52565,71	22528,16	2,295319E-06	3,004681E-06	0,00014159
5,3	8,953692E+06	71339,17	-18773,47	2,332040E-06	2,967960E-06	0,00014215
5,4	0,8360455+06	57571,96	-2502 12	2,302322E-06	2,93/0/8E-06	0,00014261
5,5	8.779725E+06	56320.40	3754.69	2,425373E-06	2,874627E-06	0.00014355
5,7	8,734668E+06	45056,32	11264,08	2,450460E-06	2,849540E-06	0,00014392
5,8	8,674593E+06	60075,09	-15018,77	2,484518E-06	2,815482E-06	0,00014442
5,9	8,633292E+06	41301,63	18773,47	2,508347E-06	2,791653E-06	0,00014477
6	8,576971E+06	56320,40	-15018,77	2,541397E-06	2,758603E-06	0,00014524

Tabelle 23: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 100 pF)



	η (150 pF)	Empfindlichke				
		it	Differenz			
Abstand [mm]	Frequenz Spule	pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktivi	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
	1,126033E+07	[[1]2]	ונ נווצן	1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,1	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,2	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,3	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,5	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,6	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,7	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
0,8	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,1	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,2	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,3	1,126033E+07			1,03/3/8E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,4	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,6	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,7	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012676
1,8	1,126033E+07			1,03/3/8E-06	4,262622E-06	0,00012676
2	1,126033E+07			1,037378E-06	4,262622E-06	0,00012070
2,1	1,096746E+07	292866,08		1,093520E-06	4,206480E-06	0,00012844
2,2	1,067459E+07	292866,08	0,00	1,154346E-06	4,145654E-06	0,00013019
2,3	1,041176E+07	262828,54	30037,55	1,213361E-06	4,086639E-06	0,00013182
2,4	9.952441E+06	222778.47	13767.21	1,270432E-06	4,029568E-06 3.972056E-06	0.00013333
2,6	9,749687E+06	202753,44	20025,03	1,383749E-06	3,916251E-06	0,00013623
2,7	9,558198E+06	191489,36	11264,08	1,439749E-06	3,860251E-06	0,00013758
2,8	9,377972E+06	180225,28	11264,08	1,495619E-06	3,804381E-06	0,00013890
2,5	9,210321L+00	153942.43	7509.39	1,548477E-00	3,731323E-00 3.698469E-06	0.00014011
3,1	8,918648E+06	143929,91	10012,52	1,653639E-06	3,646361E-06	0,00014243
3,2	8,787234E+06	131414,27	12515,65	1,703470E-06	3,596530E-06	0,00014349
3,3	8,663329E+06	123904,88	7509,39	1,752545E-06	3,547455E-06	0,00014452
3,4	8.438048E+06	105131.41	15018.77	1,802187E-06	3,497813E-06	0.00014555
3,6	8,321652E+06	116395,49	-11264,08	1,899414E-06	3,400586E-06	0,00014745
3,7	8,227785E+06	93867,33	22528,16	1,943001E-06	3,356999E-06	0,00014829
3,8	8,130163E+06	97622,03	-3754,69	1,989942E-06	3,310058E-06	0,00014918
	7.948686E+06	87609.51	6257.82	2,030700E-06	3,203300E-06	0.00015087
4,1	7,858573E+06	90112,64	-2503,13	2,129862E-06	3,170138E-06	0,00015173
4,2	7,779725E+06	78848,56	11264,08	2,173253E-06	3,126747E-06	0,00015250
4,3	7,708385E+06	71339,17	7509,39	2,213665E-06	3,086335E-06	0,00015321
4,4	7,629557E+06	52565.71	26282.85	2,239037E-06	3,040343E-06	0.00015400
4,6	7,501877E+06	75093,87	-22528,16	2,337216E-06	2,962784E-06	0,00015530
4,7	7,438048E+06	63829,79	11264,08	2,377502E-06	2,922498E-06	0,00015596
4,8	7,381727E+06	56320,40	7509,39	2,413920E-06	2,886080E-06	0,00015656
4,9	7,323407E+06	56320,40	0,00	2,451181E-06	2,848819E-06	0.00015718
5,1	7,216521E+06	52565,71	3754,69	2,525708E-06	2,774292E-06	0,00015834
5,2	7,163955E+06	52565,71	0,00	2,562908E-06	2,737092E-06	0,00015892
5,3	7,118899E+06	45056,32	7509,39	2,595453E-06	2,704547E-06	0,00015942
5,4	7.032541F+06	37546.93	-5754,09 11264.08	2.659587F-06	2,000300E-06	0,00015997
5,6	6,991239E+06	41301,63	-3754,69	2,691104E-06	2,608896E-06	0,00016087
5,7	6,942428E+06	48811,01	-7509,39	2,729078E-06	2,570922E-06	0,00016144
5,8	6,901126E+06	41301,63	7509,39	2,761842E-06	2,538158E-06	0,00016192
5,9	6,822278E+06	45056,32	-11264,08	2,826051E-06	2,473949E-06	0,00016232

Tabelle 24: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 150 pF)



	η (220 pF)					
		Empfindlichke				
		it	Differenz		а ·	
Abstand [mm]	Frequenz Spule	pro 0,1 mm	Empfindlichke	Selbstinduktivi	Gegeninduktiv	Eindringtiefe
	1.056821E+07	[[12]	ת נוזצן	9.727276E-07	4.327272E-06	0.00013084
0,1	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
0,2	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
0,3	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
0,4	1,056821E+07			9,/2/2/6E-0/	4,32/2/2E-06	0,00013084
0,5	1.056821E+07			9.727276E-07	4,327272E-00	0.00013084
0,7	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
0,8	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
0,9	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,1	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,2	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,5	1.056821E+07			9.727276E-07	4.327272E-06	0.00013084
1,5	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,6	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,7	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,8	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
1,9	1,056821E+07			9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
2	1,056821E+07	310387.98		9,727276E-07	4,327272E-06	0,00013084
2,2	9,957447E+06	300375,47	10012,52	1,095716E-06	4,204284E-06	0,00013480
2,3	9,717146E+06	240300,38	60075,09	1,150580E-06	4,149420E-06	0,00013645
2,4	9,456821E+06	260325,41	-20025,03	1,214797E-06	4,085203E-06	0,00013832
2,5	9,232791E+06	224030,04	36295,37	1,274466E-06	4,025534E-06	0,00013999
2,6	9,042553E+06	190237,80	33792,24	1,328654E-06	3,971346E-06	0,00014145
2,7	8,857322E+06	185231,54	25031 29	1,384807E-06	3,915193E-06	0,00014292
2,9	8,516896E+06	180225,28	-20025,03	1,497723E-06	3,802277E-06	0,00014575
3	8,381727E+06	135168,96	45056,32	1,546419E-06	3,753581E-06	0,00014692
3,1	8,221527E+06	160200,25	-25031,29	1,607271E-06	3,692729E-06	0,00014835
3,2	8,101377E+06	120150,19	40050,06	1,655299E-06	3,644701E-06	0,00014944
3,3	7,981227E+06	120150,19	0,00	1,705512E-06	3,594488E-06	0,00015056
3,4	7,872340E+06	108886,11	3754.69	1,753018E-06	3,546982E-06	0,00015160
3,5	7,647059E+06	120150.19	-15018.77	1,800794E-00	3,499200E-00	0.00015382
3,7	7,556946E+06	90112,64	30037,55	1,902398E-06	3,397602E-06	0,00015473
3,8	7,466834E+06	90112,64	0,00	1,948593E-06	3,351407E-06	0,00015566
3,9	7,376721E+06	90112,64	0,00	1,996491E-06	3,303509E-06	0,00015661
4	7,281602E+06	95118,90	-5006,26	2,048992E-06	3,251008E-06	0,00015763
4,1	7,206508E+06	70087.61	5006.26	2,091917E-06	3,208083E-06	0,00015845
4,3	7,056320E+06	80100,13	-10012,52	2,181914E-06	3,118086E-06	0,00016013
4,4	7,002503E+06	53817,27	26282,85	2,215580E-06	3,084420E-06	0,00016074
4,5	6,927409E+06	75093,87	-21276,59	2,263875E-06	3,036125E-06	0,00016161
4,6	6,862328E+06	65081,35	10012,51	2,307019E-06	2,992981E-06	0,00016238
4,7	6,802253E+06	60075,09	5006,26	2,347949E-06	2,952051E-06	0,00016309
4,8	6,747184E+06	55068,84	5006,26	2,380432E-06	2,913508E-00	0,00016376
4,9	6,642053E+06	50062.58	5006.26	2,462575E-06	2,837425E-06	0,00016505
5,1	6,591990E+06	50062,58	0,00	2,500121E-06	2,799879E-06	0,00016567
5,2	6,546934E+06	45056,32	5006,26	2,534651E-06	2,765349E-06	0,00016624
5,3	6,501877E+06	45056,32	0,00	2,569902E-06	2,730098E-06	0,00016682
5,4	6,451815E+06	50062,58	-5006,26	2,609939E-06	2,690061E-06	0,00016746
5,5	0,400/58E+06	45056,32	5006,26	2,040///E-06	2,053223E-06	0,00016805
5,6	6.326658F+06	40050,06	0.00	2,000182E-06	2,019018E-06	0.00016858
5.8	6,296621E+06	30037,55	10012,51	2,740180E-06	2,559820E-06	0,00016951
5,9	6,251564E+06	45056,32	-15018,77	2,779820E-06	2,520180E-06	0,00017012
6	6,211514E+06	40050,06	5006,26	2,815783E-06	2,484217E-06	0,00017067

Tabelle 25: Messergebnisse der Empfindlichkeitsmessung zwischen 2 - 6 mm (Spule Eta 220 pF)



2 mm Abstand			2 mm Abstand	
ohne Dichtungsring 25°			ohne Dichtungsring 12°	
	Iteration	Frequenz [Hz]	Iteratio	1 Frequenz [Hz]
Frequenz zu Beginn	281	15064500	Frequenz zu Beginn 2	15389200
Frequenz am Ende	1371	15126300	Frequenz am Ende 17	15636600
Frequenzanhebung		61800	Frequenzanhebung	247400
Maximaler Peak		48300	Maximaler Peak	42300
mit Dichtungsring 25°			mit Dichtungsring 12°	
	Iteration	Frequenz [Hz]	Iteratio	1 Frequenz [Hz]
Frequenz zu Beginn	345	15139300	Frequenz zu Beginn 2	14700100
Frequenz am Ende	2071	15268900	Frequenz am Ende 20	4 14877500
Frequenzanhebung		129600	Frequenzanhebung	177400
Maximaler Peak		26200	Maximaler Peak	29800
Unterschied 2 mm Abstand (25°)			Unterschied 2 mm Abstand (12°)	
Frequenzanstieg ohne Dichtung [Hz]	61800		Frequenzanstieg ohne Dichtung [Hz] 2474	0
Frequenzanstieg mit Dichtung [Hz]	129600		Frequenzanstieg mit Dichtung [Hz] 1774	00
Frequenzdifferenz Anstieg [Hz]	-67800		Frequenzdifferenz Anstieg [Hz] 700	00
Max. Peak ohne Dichtung [Hz]	48300		Max. Peak ohne Dichtung [Hz] 423	00
Max. Peak mit Dichtung [Hz]	26200		Max. Peak mit Dichtung [Hz] 298)0
Frequenzdifferenz Peaks [Hz]	22100		Frequenzdifferenz Peaks [Hz] 125)0

Tabelle 26: Messergebnisse zum Masseneffekt der Membran mit 2 mm Spulen-Membran-Abstand zu den Neigungswinkeln 12° und 25° mit und ohne Dichtungsring

4 mm Abstand		
ohne Dichtungsring 25°		
	Iteration	Frequenz [Hz]
Frequenz zu Beginn	405	11802100
Frequenz am Ende	1884	11854200
Frequenzanhebung		52100
Maximaler Peak		16000
mit Dichtungsring 25°		
	Iteration	Frequenz [Hz]
Frequenz zu Beginn	311	11924300
Frequenz am Ende	1702	12099900
Frequenzanhebung		175600
Maximaler Peak		43000
Unterschied 4 mm Abstand 25°		
Frequenzanstieg ohne Dichtung [Hz]	52100	
Frequenzanstieg mit Dichtung [Hz]	175600	
Frequenzdifferenz Anstieg [Hz]	-123500	
Max. Peak ohne Dichtung [Hz]	16000	
Max. Peak mit Dichtung [Hz]	43000	
Frequenzdifferenz Peaks [Hz]	-27000	

Tabelle 27: Messergebnisse zum Masseneffekt der Membran mit 4 mm Spulen-Membran-Abstand zu den Neigungswinkeln 12° und 25° mit und ohne Dichtungsring