



Richard Hartinger, BSc

Energieautarker drahtloser Sensorknoten zur Eiserkennung

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Studienrichtung: Telematik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Wegleiter
Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer

Institut für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung
Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Brasseur

Graz, Juni 2017

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Allen voran dem ganzen Team des Instituts für Elektrische Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung für die Unterstützung und ein sehr angenehmes Arbeitsklima. Meinen Betreuern Ass.Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Wegleiter und Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer, welche an jeder Sekunde des Tages ein offenes Ohr für mich hatten und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen! Dipl.-Ing. Michael Grubmüller, BSc für die Unterstützung und ein lustiges Arbeitsumfeld sowie Dipl.-Ing. Matthias Flatscher, BSc für unzählige spannende Gespräche in Hinblick auf diese Arbeit – auch noch zur späteren Stunde.

Weiters möchte ich der Technischen Universität Graz und in weiterer Folge dem Staat Österreich, stellvertretend für die gesamte Österreichische Bevölkerung, für das umfassende und ausgezeichnete Bildungsprogramm danken, welches ich bisher genießen durfte.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Freundinnen und Freunden, Eltern, meiner ganzen Familie und ganz besonders meiner Freundin für ihre Unterstützung, das Ermöglichen des Studiums, ihr Vertrauen und vor allem für eine wunderbare Zeit danken.

Danke.

Affidavit

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Date/Datum

Signature/Unterschrift

Kurzfassung

Für Systeme, die in kalten Klimazonen arbeiten, kann der Einfluss von Eisbildung wesentliche Auswirkungen auf deren Performance haben, ein Sicherheitsrisiko darstellen oder in Extremfällen zu dauerhaften Schäden führen. Um diesen negativen Folgen entgegenzuwirken, ist es notwendig, die Bildung von Eis rechtzeitig zu erkennen und gegebenenfalls entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Beispielhaft für einige Anwendungen sei hier die Eisbildung auf Hochspannungsleitungen, Antennen oder Windrädern genannt. Windräder, die in letzter Zeit immer häufiger als erneuerbare Energiequelle eingesetzt werden, müssen bei Eisbildung zum Stillstand gebracht werden, um ein potenzielles Sicherheitsrisiko aufgrund eines möglichen Eisabwurfes von den Rotorblättern auszuschließen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung eines Gerätes, mit dem es möglich ist, Eis und Wasser zu unterscheiden und bei vorhandenem Eis auf die Eisdicke rückzuschließen. Konkret wird dies mit außen am Gerät befindlichen Elektroden über Kapazitäts- und Impedanz-Messverfahren realisiert. Es kann gezeigt werden, dass mit beiden Messverfahren Wasser und Eis unterschieden werden kann, sich beide Methoden sehr gut ergänzen und in Testabläufen auf die Eisdicke rückgeschlossen werden kann.

Das entwickelte Gerät ist über eine Funkschnittstelle mit einer Basisstation verbunden, welche die entsprechenden Daten an einen Computer zur Auswertung weiterleitet. Es kann eine mögliche Reichweite von mehr als $1,4\text{ km}$ zwischen Gerät und Basisstation gezeigt werden.

Des Weiteren geht diese Arbeit auf die Stromaufnahme des Gerätes und dessen einzelne Komponenten ein und präsentiert eine mögliche autarke Lösung mittels Solarzelle und Akku. Dazu wird die aus der Solarzelle gewonnene Energie an einem bewölktem Tag gemessen. Daraus wird berechnet, dass weniger als ein Monat nötig ist, um das System mit ausreichend Energie für ein Jahr zu versorgen.

Abstract

For systems, which operate in cold regions, the influence of ice accretion can have an essential impact on their performance, on security issues or could lead to permanent damage. To avoid this negative consequences, it is necessary to detect the ice accretion at an early state and if necessary to start with countermeasures. For instance, the ice accretion on overhead power lines, antennas or wind turbines could be mentioned. Wind turbines, which have often been used as renewable energy in the past years, must be switched off in the event of ice due to security issues from a potential cast ice (ice can be thrown from the blades). The aim of this work is the design and evaluation of a device, which should be able to distinguish between ice and water and to estimate the thickness of ice. This should be done by electrodes on the outer shell of the device, with the help of capacitive and impedance measurements techniques. It can be shown, that it is possible to distinguish between water and ice with both techniques, that both have their advantages and that an ice thickness estimation in some scenarios is possible.

The device is connected through a radio interface to the base station, which pushes the received data to a computer for further analysis. It can be shown, that a range of more than 1,4 km could be reached between the device and the base station.

Another aim of this work is to analyse the current consumption of the device and its individual components and to present an energy harvesting solution for autonomous operation with a solar cell and a battery. For this reason the energy from the solar cell was measured on a cloudy day. Based on this data it can be shown, that less than a month is necessary to power the system for a whole year.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Stand der Technik	4
2	Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren	8
3	Systementwicklung	15
3.1	Konzept	15
3.2	Kapazitäts-Messung	18
3.3	Impedanz-Messung	19
3.4	Elektroden	21
3.5	Energieversorgung	24
3.6	Controller und Kommunikation	26
3.7	Software	28
3.7.1	Sensor	28
3.7.2	Basisstation	30
3.7.3	Computer	31
4	Eis- und Wasser-Messungen	32
4.1	Testmessung mit Nachbildungen	34
4.2	Vereisung von Wassertropfen	43
4.3	Vereisung eines Wasserfilms	48
4.4	Vereisung unterschiedlicher Wassertropfen	54
4.5	Dicker werdende Eisschicht	62
4.6	Eisdicken-Messung 1	67
4.7	Eisdicken-Messung 2	70
4.8	Messung bei Raureif	74
5	Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite	80
5.1	Stromverbrauch	80
5.2	Autarke Energieversorgung	86

Inhaltsverzeichnis

5.3 Reichweitentest	90
6 Zusammenfassung	92
Literatur	94
Anhang	105
Verwendete Programme	105
Mögliche Erweiterungen	105

1 Einleitung

Eisbildung ist ein häufiges Phänomen in kalten und rauen Klimaregionen. Systeme, die in solchen Umgebungen arbeiten, können durch die Eisbildung beeinflusst werden. Es kann dadurch die Performance gesenkt werden, das System zerstört werden oder es können Sicherheitsrisiken entstehen. Dies kann am Beispiel von Windkraftanlagen veranschaulicht werden. Windkraftanlagen, welche in letzter Zeit aufgrund der Förderung von erneuerbaren Energien immer häufiger eingesetzt werden, verlieren bei der Bildung von Eis an Effizienz. Des Weiteren entsteht für das umliegende Gebiet ein Sicherheitsrisiko durch den möglichen Eisabwurf von den Rotorblättern. Damit dieses Sicherheitsrisiko minimiert werden kann, müssen Windkraftanlagen beheizt oder für die Dauer der Vereisung abgeschaltet werden. Eine weitere Herausforderung stellen Hochspannungsleitungen dar. Die Leiterseile können durch die Bildung von Eis wesentlich an Gewicht zunehmen und dies kann soweit führen, dass Stromleitungen und in weiterer Folge ganze Stromnetze zusammenbrechen können. Ein drittes Beispiel sind Antennen, welche für die Funkkommunikation eingesetzt werden. Diese arbeiten nur unter gewissen Bedingungen zuverlässig – Eis kann solche Systeme stark einschränken. Die Liste der Systeme, die durch die Bildung von Eis eingeschränkt werden können, ist umfassend – die genannten drei seien hier nur beispielhaft erwähnt.

Durch eine frühzeitige Eiserkennung können Systeme Gegenmaßnahmen – wie zum Beispiel das Aktivieren einer Heizung – einleiten und falls dies keinen Erfolg mit sich bringen, kontrolliert abgeschaltet werden. Dies zeigt die Notwendigkeit einer möglichst frühen und zuverlässigen Eiserkennung.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung eines Sensors / Gerätes, mit dem es möglich ist, Eis und Wasser auf den Elektroden zu unterscheiden und bei vorhandenem Eis auf die Eisdicke rückzuschließen. Konkret wird dies mit außen am Gerät angebrachten Elektroden über Kapazitäts- und Impedanz-Messverfahren realisiert. Diese beiden direkten Messverfahren

1 Einleitung

messen die Auswirkungen der Veränderungen, die durch die Eisbildung entstehen – wie zum Beispiel die Veränderung der Permittivität – direkt. Ganz im Gegensatz zu indirekten Messverfahren, welche zum Beispiel Klimadaten – wie Temperaturen und Luftfeuchtigkeit – auswerten und daraus auf die Bildung von Eis schließen. [1]

Das Kapazitäts- und das Impedanz-Messverfahren haben dabei den Vorteil, dass – im Gegensatz zu beispielsweise optischen, Mikrowellen- oder Ultraschall-Messungen – schon kleinere Eisschichten erkannt und somit frühe Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können [2]. Des Weiteren sind die eingesetzten Verfahren nicht auf die Sichtverhältnisse – wie es beispielsweise optische Messverfahren sind – angewiesen.

Um das Messgerät möglichst flexibel einsetzen zu können, ist dieses über eine Funkschnittstelle mit einer Basisstation verbunden. So kann das Gerät möglichst nahe am Messobjekt und relativ kompakt aufgebaut werden, während die Basisstation, welche die entsprechenden Daten an einen Computer zur Auswertung weiterleitet, in einiger Entfernung und besser geschützt positioniert werden kann.

Das Gerät ist energiesparend designt, um eine möglichst lange Versorgung mit dem eingebauten Akku zu ermöglichen. Damit eine autarke Versorgung von mehreren Jahren möglich ist, ist das System zusätzlich mit Solarzellen ausgerüstet, die bei gegebenen Lichtverhältnissen den Akku aufladen können. Der Akku ist bewusst groß dimensioniert, um Zeiträume von mehr als einem Jahr ohne ausreichend Licht überbrücken zu können.

Durch diese umfassenden Anforderungen stellen sich unter anderem folgende Fragen, die im Zuge der vorliegenden Arbeit beantwortet werden sollen:

Kapazitäts-Messung:

- Kann mit der Kapazitäts-Messung zwischen Eis und Wasser unterschieden werden?
- Kann mit der Kapazitäts-Messung die Eisdicke bestimmt werden?
- Wie sind die Ergebnisse vom Temperaturdrift abhängig?

Impedanz-Messung:

- Kann mit der Impedanz-Messung zwischen Eis und Wasser unterschieden werden?
- Welche Frequenzen werden dazu benötigt?

1 Einleitung

- Wie sind die Ergebnisse vom Temperaturdrift abhängig?

Stromverbrauch, autarke Versorgung und Reichweite:

- Wie hoch liegt der Stromverbrauch einzelner Komponenten?
- Ist eine Versorgung des Systems über ein Jahr ohne die Mithilfe der Solarzelle möglich?
- Kann das Gerät mithilfe der Solarzelle über einen Zeitraum von mehreren Jahren energieautark betrieben werden?
- Was wären mögliche Optimierungen, um den Stromverbrauch zu verringern?
- Welche Reichweite (Distanz zwischen Sensor und Basisstation) kann erreicht werden?

In der vorliegenden Arbeit wird zunächst der derzeitige Stand der Technik erläutert, indem grundlegende Funktionsweisen und – für die Designentscheidungen – wichtige Arbeiten vorgestellt werden. In weiterer Folge wird im Kapitel *Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren* die grundlegende Theorie der Messverfahren und die prinzipielle Funktion der Elektroden erläutert. Im Kapitel *Systementwicklung* wird das Gesamtkonzept vorgestellt und einige Designentscheidungen werden begründet, wobei auf die unterschiedlichen Komponenten wie Kapazitäts-Messung, Impedanz-Messung, Energieversorgung, Controller, Kommunikation, Software und Elektrodengeometrie näher eingegangen wird. Im Kapitel *Eis- und Wasser-Messungen* werden einzelne Testszenarien für die Wasser-Eis-Unterscheidung sowie für die Eisdicken-Messung vorgestellt und in weiterer Folge werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Weitere Tests über den Stromverbrauch des Systems, einzelner Komponenten sowie Messungen mit der Solarzelle und Reichweitentests werden im darauf folgenden Kapitel *Stromverbrauch, autarke Versorgung und Reichweite* behandelt. Die wesentlichen Inhalte und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit werden schließlich noch zusammengefasst.

Stand der Technik

In [1],[3], [4] und [5] werden verschiedene Eis-Arten und mögliche Methoden der Eis-Detektion beschrieben. Dabei werden die unterschiedlichen physikalischen Verfahren aufgelistet und die jeweiligen Vor- und Nachteile behandelt. Es werden die unterschiedlichen Verfahren in direkte und indirekte Messverfahren unterteilt. Indirekte Messverfahren messen Wettergegebenheiten, die zu Eis führen können, wie zum Beispiel die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit. Direkte Messverfahren hingegen messen die Eigenschaften, welche sich aufgrund der Vereisung ändern, wie beispielsweise die Permittivität. [1]

In [1] werden die unterschiedlichen Verfahren zur Messung von Eis auf Windrädern beschrieben. Der Autor benennt die Eis-Detektion als eine der größten Herausforderungen. Als vielversprechende Lösungsverfahren werden unter anderem zwei direkte Verfahren – nämlich das Kapazitäts- und Impedanz-Messverfahren – genannt, beide werden in der vorliegenden Arbeit angewendet. [1]

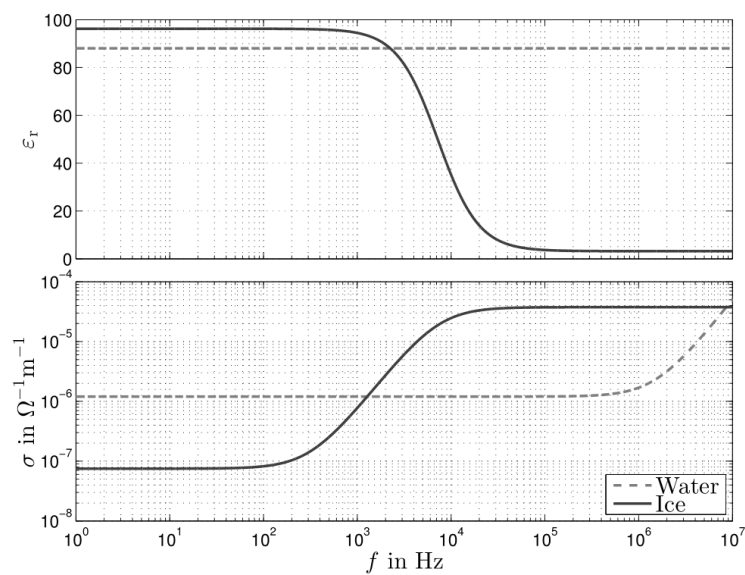


Abbildung 1.1: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität und des Leitwertes von Wasser und Eis bei 0 °C [6]

1 Einleitung

Das physikalische Grundprinzip der Eismessung bei diesen Verfahren basiert auf der Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität ϵ und des Leitwertes von Wasser und Eis [7] [8]. Wie aus Abbildung 1.1 ersichtlich ist, verändert sich bei höheren Frequenzen sowohl die Permittivität als auch der Leitwert zwischen dem Zustand Wasser und Eis. Der Permittivitätsverlauf von Wasser bleibt bei den in Abbildung 1.1 dargestellten Frequenzen konstant. Bei Eis hingegen ist eine Verkleinerung der Permittivität ab ~ 1 kHz zu beobachten. Beim Leitwert ist ein ähnlicher Verlauf zu beobachten: Im Zustand Wasser bleibt der Leitwert bis zu höheren Frequenzen (~ 800 kHz) konstant und nimmt danach zu. Bei Eis hingegen ist mit einer wesentlich früheren Zunahme (~ 200 Hz) zu rechnen. Dieses Grundprinzip wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um zwischen Wasser und Eis unterscheiden zu können.

- **Kapazitäts-Messverfahren:** Mithilfe dieses Messverfahrens wird die Kapazität der Elektroden ermittelt. Aufgrund deren Messwerte kann eine Veränderung der Kapazität – wie sie beim Vereisungs- bzw. Abtauvorgang auftreten würde – detektiert und somit auf Wasser oder Eis rückgeschlossen werden. Das Messverfahren sollte die Kapazität mit einer Messfrequenz von über ~ 10 kHz messen, damit ein größerer Permittivitäts-Unterschied zwischen den Zuständen Wasser und Eis vorhanden ist.
- **Impedanz-Messverfahren:** Mithilfe dieses Messverfahrens wird der Real- und Imaginär-Teil der Impedanz zwischen zwei Elektroden bestimmt. Über ein einfaches Modell (Widerstand parallel zum Kondensator) kann die Kapazität und der Leitwert berechnet werden. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass bei mehreren Frequenzen gemessen werden kann. Dadurch kann beispielsweise bei 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz und 100 kHz gemessen werden. Wenn nun die Kapazität und der Leitwert über alle gemessenen Frequenzen nahezu gleich sind, deutet dies auf den Zustand Wasser bzw. Luft hin. Nimmt hingegen die Kapazität bei höheren Frequenzen ab und der Leitwert bei höheren Frequenzen zu, deutet dies auf Eis hin. [6]

Das der in Abbildung 1.1 gezeigte Verlauf sich mit der Temperatur verschiebt, wird in [8] und [9] gezeigt. Der Kurvenverlauf der Permittivität verschiebt sich bei kälteren Temperaturen in Richtung tieferer Frequenzen, wobei auch eine Betragsänderung festzustellen ist. Der Leitwert verhält sich grundsätzlich

1 Einleitung

ähnlich. Diese Verschiebungen müssen bei der Eisdetektion beachtet werden.

Historisch betrachtet, wird das Thema *Eismessungen* am Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung an der Technischen Universität Graz bereits seit einiger Zeit behandelt. In [10] und [11] wird ein ähnliches Konzept, wie in der vorliegenden Arbeit, für Hochspannungsleitungen aufgebaut und unter realen Bedingungen durchgeführt. Dabei wird ein Gerät entwickelt, welches aus dem elektrischen Feld der Hochspannungsleitung Energie gewinnt und damit das restliche System versorgen kann [12]. Das vorgestellte Verfahren verwendet zur Eismessung ein kapazitives System, welches modifizierte Koaxialkabel (ohne äußeren Schirm) als Elektroden verwendet. In einer Vorstufe wird ein ähnliches Experiment unter Laborbedingungen untersucht [13]. Es wird gezeigt, dass in diesen Szenarien zwischen Eis und Wasser unterschieden werden kann. In beiden Arbeiten und in [2] wird der Effekt beschrieben, dass der Koppelpfad der Messelektroden zu Masse-Potenzial in gewissen Szenarien dominant werden kann und somit die gemessene Kapazität verringert wird.

Auch Impedanz-Messungen zur Eis-Detektion werden am Institut untersucht. In [6] wird der Impedanzverlauf vom Zustand Eis zu Wasser über verschiedene Frequenzen dargestellt. Dadurch kann die Theorie der Kurvenverläufe in einem realen Szenario nachgewiesen und die technisch mögliche Umsetzung gezeigt werden. Des Weiteren wird beschrieben, dass es – abhängig vom Elektrodenaufbau – zu einer Verschiebung des Kurvenverlaufes der Permittivität und des Leitwertes hin zu höheren Frequenzen kommt. Der Autor weist auf die Notwendigkeit einer Temperaturmessung hin, um auf Eis und Wasser rückschließen zu können.

In der Publikation [14] werden unterschiedliche Impedanzverläufe von verschiedenen Eisarten und Wasser gezeigt. Dabei wird das gleiche Impedanz-Messverfahren wie in der vorliegenden Arbeit angewendet und es wird angemerkt, dass es teilweise zu einem hohen Rauschanteil kommt. In [15] und [16] wird ein System präsentiert, welches die Elektroden gleichzeitig als Heizung verwenden kann, um Gegenmaßnahmen zu Verhinderung der Eisbildung einzuleiten.

Da in dieser Arbeit ein energieautarker drahtloser Sensorknoten für raue Umgebungen designt und gebaut wird, sind einige Publikationen aus diesem Bereichen zu erwähnen.

1 Einleitung

Drahtlose Sensorknoten in rauen Umgebungen werden in [17] und [18] behandelt. Hier werden die Erfahrungen von vielen größeren Sensornetzwerken in unterschiedlichsten Regionen, unter anderem auch in den Schweizer Alpen, beschrieben. Ein Sensor verwendet dabei eine Solarzelle und zwei Energiespeicher, um eine autarke Energieversorgung sicherzustellen. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Knoten erfolgt über das 868 MHz ISM Band, welches sich im Laufe der Tests als relativ unempfindlich gegenüber rauen Umgebungen erwiesen hat.

In [19] wird ein System vorgestellt, welches ein drahtloses Sensornetzwerk in einem Gletscher beschreibt. Die in der Arbeit vorkommenden Sensorknoten und die Basisstation sind dabei auf die extremen Witterungsverhältnisse ausgelegt.

In den Arbeiten [20] und [21] wird gezeigt, dass drahtlose Sensorknoten mit relativ wenig Energie auskommen können und wie eine autarke Energieversorgung mit Solarzellen und einfacher maximaler Leistungsanpassung realisiert werden kann.

In [22] werden unterschiedliche Energiespeicher und mögliche Energiequellen für eine autarke Versorgung unter sehr kalten Temperaturen behandelt. Es wird gezeigt, dass Li-Ionen Akkus bei tiefen Temperaturen in rauer Umgebung eingesetzt werden können.

Des Weiteren werden in [2] einige Aspekte für Systeme in elektromagnetisch stark gestörten Umgebungen (zum Beispiel in der Nähe von Hochspannungsleitungen) behandelt und eine autarke Versorgung präsentiert.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, möglichst alle beschriebenen Publikationen einfließen zu lassen. Es wird besonders auf das Kapazitäts- und das Impedanz-Messverfahren eingegangen, wobei letzteres neue Erkenntnisse liefern soll. Daher wird beim Impedanz-Messverfahren versucht, einen möglichst breiten Messfrequenzbereich abzudecken, um neue Erkenntnisse aus praxisnahen Aufbauten zu erlangen. Des Weiteren werden viele Vereisungs-Szenarien nachgebildet, um eine möglichst umfassende Aussage über die Verfahren treffen zu können.

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren und die prinzipielle Funktion der Elektroden näher erläutert. Dabei erhebt die vorliegende Arbeit nicht den Anspruch, tiefere physikalische Grundlagen zu beschreiben. Viel mehr werden im folgenden Teil nur grundlegende Funktionsweisen beschrieben, die einen Ansatz zur Erklärung und Interpretation der Messdaten liefern sollen.

Das physikalische Grundprinzip, der in dieser Arbeit verwendeten Eismessungen, basiert auf der Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität ϵ und des Leitwertes von Wasser und Eis [7] [8]. In Abbildung 2.1 ist ersichtlich, dass sich die Permittivität und der Leitwert zwischen dem Zustand Wasser und Eis bei höheren Frequenzen verändern. Dieses Grundprinzip wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um zwischen Wasser und Eis unterscheiden zu können. Die relative Permittivität für Wasser ist bis ~ 1 GHz konstant und liegt bei ungefähr 90. Bei Eis, das bei niedrigen Frequenzen eine ähnliche relative Permittivität wie Wasser aufweist, sinkt die Permittivität jedoch schon wesentlich früher ab, nämlich ab ~ 1 kHz, und geht auf ~ 3 zurück. Auch beim Leitwert ist ein früherer Knick beim Zustand Eis als beim Zustand Wasser zu erkennen.[7]

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

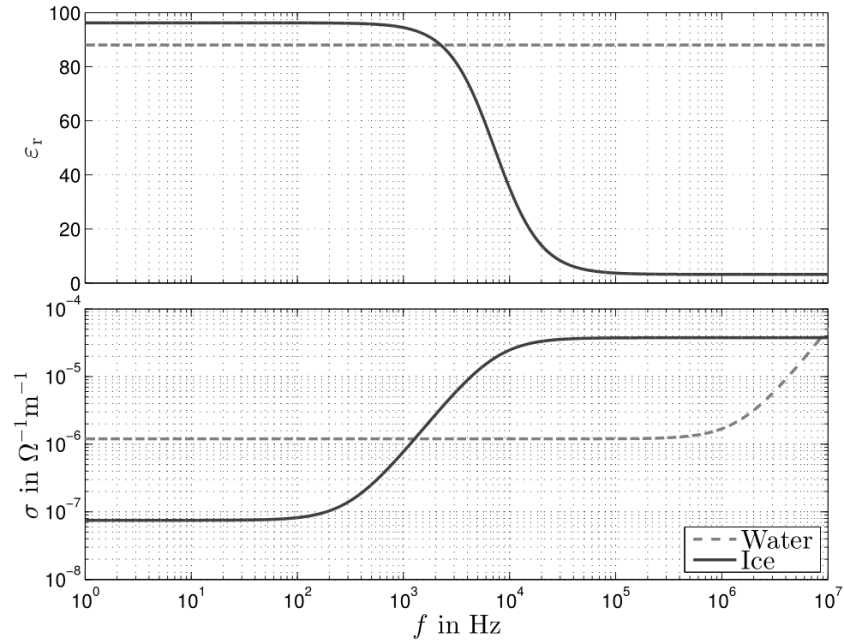


Abbildung 2.1: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität und des Leitwertes von Wasser und Eis bei 0 °C [6]

In weiterer Folge wird erläutert, wie das jeweilige Verfahren diese Grundlagen nützt. Die angeführten grundlegenden Überlegungen sind vereinfacht, zeigen aber die grundsätzlichen Funktionsweisen und deren Unterschiede auf.

- **Kapazitäts-Messverfahren:** Das Verfahren misst bei einer Frequenz, welche über dem zuvor beschriebenen Permittivitätsknick (größer als ~ 10 kHz) von Eis liegt, die Kapazität. Diese Kapazität ist, aufgrund der konstanten Geometrie der kapazitiven Elektrode, proportional zur relativen Permittivität. Aus der Kapazitäts- bzw. Permittivitäts-Änderung – welche beim Vereisungs- bzw. Abtau-Vorgang auftritt – kann auf Eis oder Wasser rückgeschlossen werden. Ein Nachteil, der sich daraus ergibt, ist jener, dass wenige Wassertropfen vereinzelt zwar eine hohe Permittivität haben, sich in Summe aber nur eine kleine Permittivität für die Elektrode ergibt, welche wiederum wie eine Eisschicht wirken könnte. Dies stellt Herausforderungen an den Algo-

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

rithmus, der die Messdaten auswertet. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Kapazitäten und Kapazitätsänderungen im vorliegenden Hardware-Aufbau sehr genau bestimmt werden können und somit eine Eisdickenmessung ermöglicht wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer Eisdicken-Messung grundsätzlich wesentlich kleinere Kapazitätsänderungen gemessen werden müssen. Zu beachten ist, dass das Messsystem – über einen längeren Zeitraum und über weite Temperaturbereiche – aufgrund eines benötigten Bezugspunktes (Elektrode im trockenen Zustand) relativ stabil sein muss. In der vorliegenden Arbeit wird mit Referenzkapazitäten versucht diese Stabilität zu erreichen.

- **Impedanz-Messverfahren:** Das Verfahren, welches den Real- und Imaginär-Teil der Elektrode bestimmt, misst diese bei unterschiedlichen Frequenzen. Daraus kann beispielsweise die Impedanz bei 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz und 100 kHz gemessen werden. Aus der Impedanz kann über ein einfaches Modell (Widerstand parallel zum Kondensator) auf die Kapazität und den Leitwert zurückgerechnet werden. Darauf kann über die Kapazitäts- bzw. Leitwert-Unterschiede bei unterschiedlichen Frequenzen auf Eis oder Wasser rückgeschlossen werden. Ein großer Kapazitätsunterschied zwischen hohen und niedrigeren Frequenzen deutet auf eine unterschiedliche relative Permittivität und damit auf Eis hin, wohingegen ein sehr geringer Kapazitätsunterschied auf Wasser bzw. Luft hindeutet. Ähnlich verhält es sich auch bei den Leitwerten, mit der Ausnahme, dass der Leitwert mit höherer Frequenz bei Eis größer wird. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass bei mehreren Frequenzen gemessen werden kann und sich aus den Kapazitäts- und Leitwert-Verhältnissen eine Tendenz hin zu Wasser oder Eis ablesen lässt. Dadurch kann ein größerer Temperatur- bzw. Langzeit-Drift – als beim Kapazitäts-Messverfahren – in Kauf genommen werden. Es lassen sich dadurch die Nachteile des kapazitiven Verfahrens ausgleichen, wodurch es grundsätzlich zu einer kleineren Fehlerquote bei der Wasser-Eis-Unterscheidung kommen sollte. Der Nachteil der Impedanz-Messung ist, dass im vorliegenden Hardware-Aufbau bei Weitem nicht so kleine Kapazitätsänderungen wie mit dem kapazitiven Verfahren ermitteln werden können und es dadurch für die Eisdickenmessung mit kleiner Elektrodenanordnung – und damit für kleine Kapazitätswerte – nur bedingt geeignet ist.

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

Die zuvor genannten Analysen basieren auf den Kurvenverläufen in Abbildung 2.1, die für 0 °C berechnet sind. Diese Kurvenverläufe sind jedoch temperaturabhängig (siehe Abbildungen 2.2 und 2.3). So verschiebt sich der Kurvenverlauf der Permittivität bei kälteren Temperaturen in Richtung tieferer Frequenzen, wobei auch eine Betragsänderung festzustellen ist. Der Leitwert verhält sich dabei grundsätzlich ähnlich. Diese Verschiebungen müssen bei der Eisdetektion beachtet werden. In der vorliegenden Arbeit wird dies durch zusätzliche Temperaturmessungen realisiert. [8] [9]

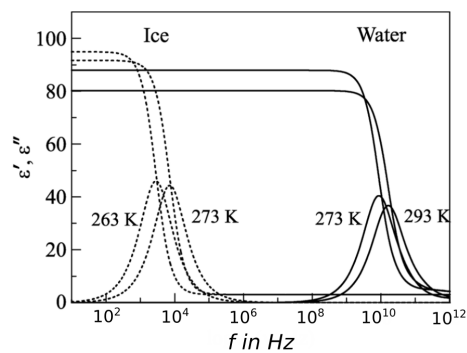


Abbildung 2.2: Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität von Wasser und Eis bei unterschiedlichen Temperaturen. Adaptiert von [8].

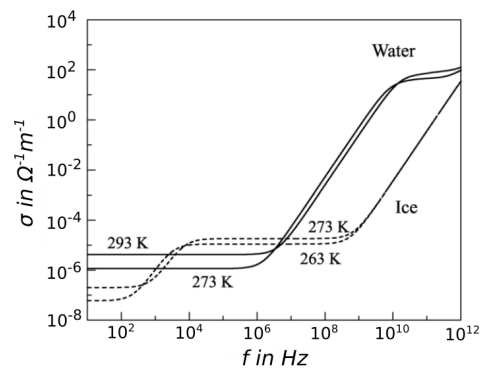


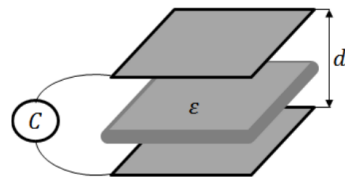
Abbildung 2.3: Frequenzabhängigkeit des Leitwertes von Wasser und Eis bei unterschiedlichen Temperaturen. Adaptiert von [8].

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

Im folgenden Abschnitt wird auf die grundlegende Theorie der Elektroden eingegangen. Der Aufbau einer Elektrode ist in Abbildung 2.4 dargestellt. In (a) ist ein Plattenkondensator abgebildet. Zwischen den beiden leitenden Platten befindet sich das Material, welches eine für die Kapazität wesentliche Permittivität ϵ besitzt. Die Kapazität wird zwischen diesen Platten gemessen.

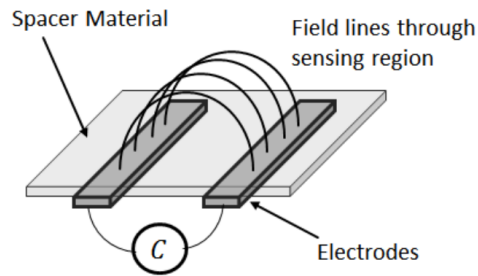
Über die bekannte Formel 2.1 kann die Kapazität des Plattenkondensators (a) berechnet werden [23]. Dabei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, ϵ_r die relative Permittivität, A die Fläche einer Platte und d die Distanz zwischen den beiden Platten.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.1)$$



(a) Plate capacitor assembly for the illustration of the capacitive sensing principle.

In (b) sind die Platten des ursprünglichen Plattenkondensators (a) aufgefaltet. Dies veranschaulicht das Elektrodenprinzip mit der entsprechenden Feldlinienverteilung, welches in der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Durch die Änderung der Geometrie wird ein wesentlich praktikablerer Aufbau der Elektrode ermöglicht (die Vereisung kann auf einer ebenen Fläche stattfinden, anstatt zwischen zwei Platten). Sowohl das Kapazitäts- als auch das Impedanz-Messverfahren setzen auf diese Art der Elektrodenstruktur.



(b) Planar capacitive sensor.

Abbildung 2.4: Grundprinzip der Elektrode. Ein Plattenkondensator wird auf eine gerade Sensorfläche aufgefaltet. [24]

Um den grundlegenden Verlauf der Kapazitätsänderungen zu erklären, bietet sich das in der Arbeit [2] beschriebene Modell an. Hierbei werden außerhalb einer Hochspannungsleitung Elektroden angebracht (zwei Empfangs-Elektroden (R1)(R2) in unterschiedlichen Abständen zu einer Sendelektrode (T)). In Abbildung 2.5 sind die dabei entstehenden Verschiebestrome bei un-

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

terschiedlichen Luft-/Wasser-/Eis-Schichten dargestellt. Die Elektroden sind innerhalb der einzelnen Hochspannungsleitungslitzen eingebettet.

Wenn die Permittivität klein ist (wie bei Luft $\epsilon_r = 1$), sind die Verschiebestrome klein sowie nahe an und um die Sende-Elektrode verteilt (a). Daraus resultiert ein kleiner Koppelpfad bzw. eine kleine Kapazität. Wenn die Elektroden von einer Eisschicht umgeben sind, erhöht sich die Permittivität ($\epsilon_r > 2$). Dadurch erhöhen sich die Verschiebestrome und auch die Verteilung dieser Ströme nimmt zu (b). Daraus ergibt sich ein größerer Koppelpfad zwischen Sender- und jeweiliger Empfänger-Elektrode, was wiederum zu einer größeren Messkapazität führt. Wenn die Eisschichten dicker werden, bewirkt dies eine weitere Verteilung der Verschiebestrome (d). Ab einer gewissen Eisdicke kommt es zu einer Verringerung der Kapazität zur Empfänger-Elektrode R1. Bei noch dickeren Eisschichten wird dieser Effekt auch bei der Empfänger-Elektrode R2 sichtbar. Wenn die Permittivität groß wird (wie bei Wasser $\epsilon_r = 80$), erhöhen sich die Verschiebestrome (c). Durch die starke Koppelung zur Masse (in diesem Beispiel zur Hochspannungsleitung) konzentriert sich das Feld um die Sende-Elektrode herum. Dadurch ist der Koppelpfad bzw. die Messkapazität zu den Empfangs-Elektroden gering. Dies setzt aber voraus, dass ein starker Koppelpfad zum Massepotenzial vorhanden ist. Sollte dies nicht der Fall sein (beispielsweise weil Wasser so aufgetragen wird, dass nur zwischen Sender- und Empfangs-Elektrode ein guter Koppelpfad besteht), erhöht die höhere Permittivität die Verschiebestrome zwischen der Sender- und Empfangs-Elektrode und damit auch den Koppelpfad bzw. die gemessene Kapazität. [2]

Aus diesen grundsätzlichen Überlegungen ergibt sich die Notwendigkeit, die Elektrodenstruktur und deren Anordnung mit passenden Abständen zueinander und zum Massepotenzial gut auszuwählen.

2 Grundlagen der verwendeten Eis-Messverfahren

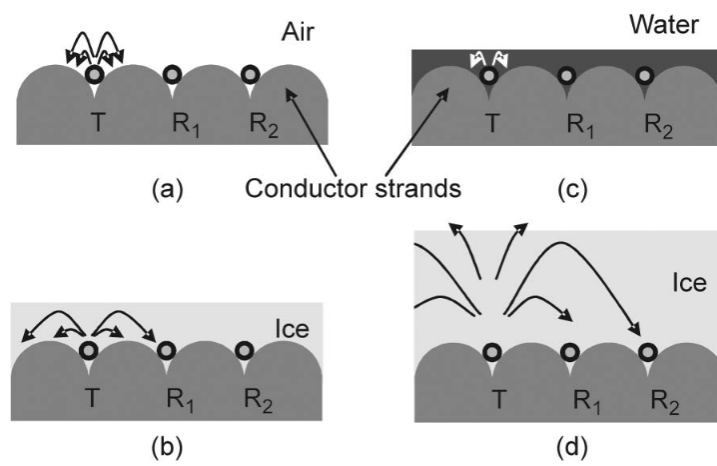


Abbildung 2.5: Aufbau und Darstellung der Verschiebestrome einer Elektrode bei unterschiedlichen Luft-/Wasser-/Eis-Schichten. Es wird ersichtlich, dass für Stoffe mit hoher Permittivität, wie etwa Wasser, die Verschiebestrome direkt zu Masse gehen. Daraus ergibt sich eine kleinere Kapazität. [2]

3 Systementwicklung

In diesem Kapitel wird auf den eigentlichen Systementwurf eingegangen. Hierzu werden Designentscheidungen erklärt und einzelne Systemkomponenten beschrieben.

Für die vorliegende Arbeit werden zwei Geräte-Versionen entwickelt. Mit der ersten Version (V1.0) soll die prinzipielle Funktion des Verfahrens gezeigt werden, wobei noch keine Priorität auf ein energiesparendes Design oder eine autarke Versorgung gelegt wird. Darauf aufbauend wird eine verbesserte zweite Version (V2.0) entwickelt. In den weiteren Abschnitten wird nur auf die zweite Variante eingegangen.

3.1 Konzept

Der prinzipielle Systemaufbau ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das entwickelte Gerät, im weiteren Verlauf auch als Sensor bezeichnet, sendet in regelmäßigen Zeitabständen über eine Funkschnittstelle die Sensordaten an eine Basisstation, welche diese wiederum an einen Computer weiterleitet.

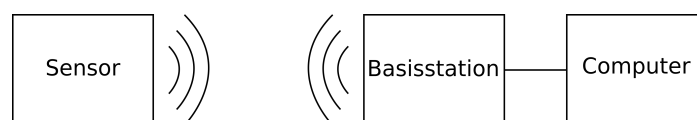


Abbildung 3.1: Blockschaltbild des Gesamtaufbaus

Der Sensor, der in Abbildung 3.2 dargestellt wird, besteht aus einem Gehäuse nach der IP65 Schutzklasse mit außen angebrachten PCB-Elektroden, welche durch eine dünne Glasschicht geschützt werden und Solarzellen. Im Inneren befindet sich ein Mikrocontroller mit integrierter Hochfrequenz-Schnittstelle,

3 Systementwicklung

ein IC für die Steuerung der Energieversorgung, die zwei Messschaltungen für die Impedanz- und Kapazitäts-Messungen, ein Akku als Energiespeicher und ein Sensor zur Temperaturmessung.

Für die Funkkommunikation ist das ISM 868 MHz Band mit einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung in Verwendung. Dieses Frequenzband hat sich in der Vergangenheit als robust gegen ein raues Umfeld erwiesen und hat eine höhere Reichweite sowie bessere Ausbreitungseigenschaften als höhere Frequenzbänder, wie zum Beispiel das 2,4 GHz Band [17] [25] [26] [19].

Als Basisstation wird das CC1310 Launchpad von Texas Instruments verwendet [27], welches über eine virtuelle serielle Schnittstelle über USB mit dem Computer verbunden ist.

Am Computer nimmt ein Datenlogger die Sensordaten auf und speichert diese für die anschließende Weiterverarbeitung.

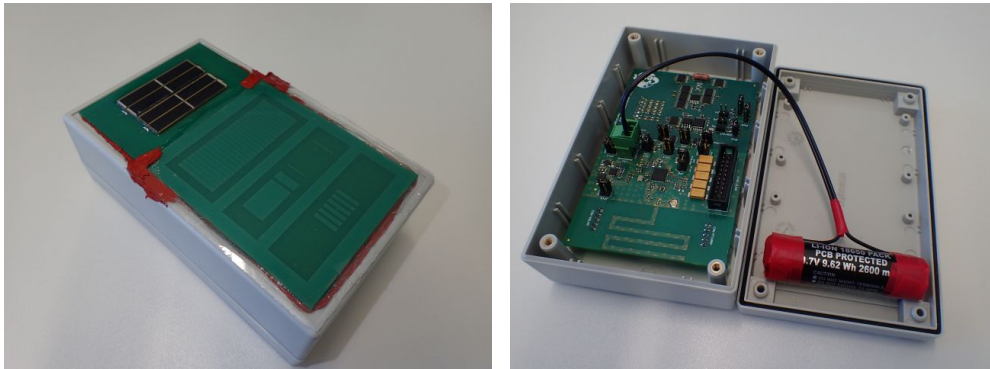


Abbildung 3.2: (links) Sensor mit Solarzellen und Elektroden, (rechts) geöffneter Sensor mit Li-Ionen Akku

In Abbildung 3.3 ist ein einfaches Blockschaltbild des entwickelten Sensors dargestellt. Hier sind die außerhalb des Sensors angebrachten Komponenten in rot, jene für die Energieversorgung bzw. deren Verteilung in gelb, jene für die Steuerung und Kommunikation in blau und jene für die Messungen in orange dargestellt. In Abbildung 3.4 ist der reale Innenaufbau des Sensors zu sehen. Ein Blockschaltbild mit zusätzlich eingezeichneten Datenverbindungen und möglichen Strom-Messpunkten ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Im Folgenden werden die einzelnen Blöcke und deren Zusammenspiel beschrieben.

3 Systementwicklung

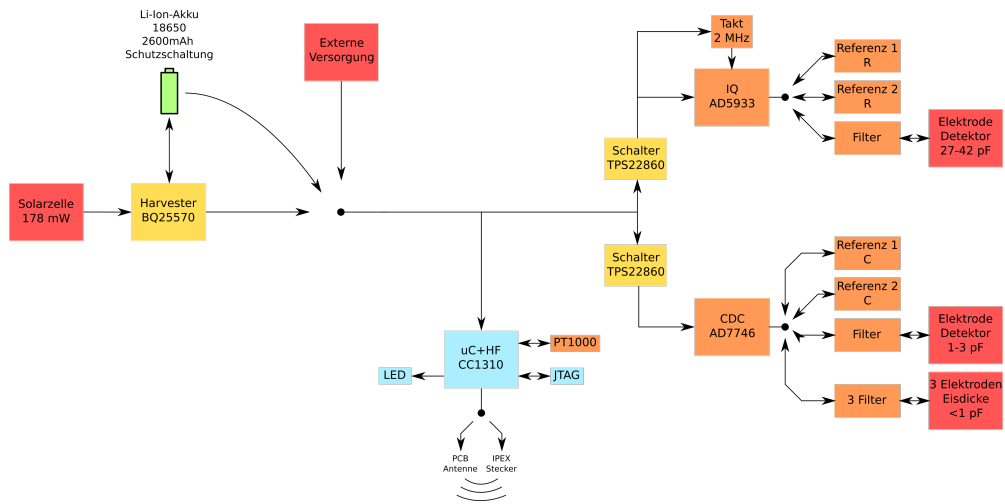


Abbildung 3.3: Blockschaltbild des Sensors

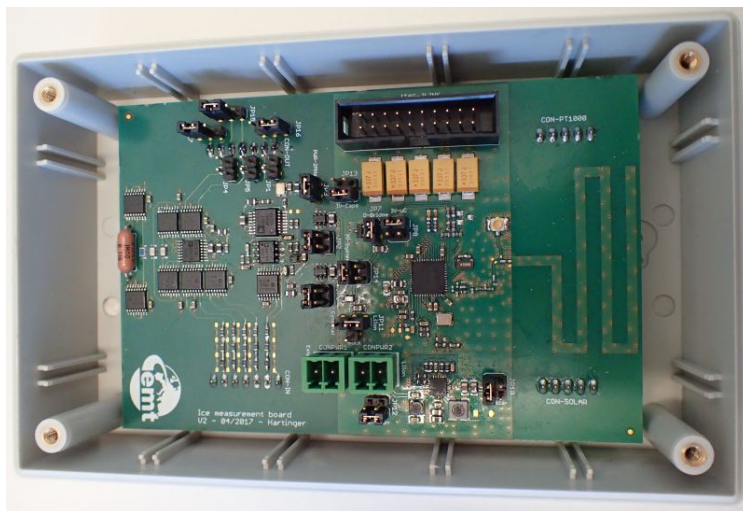


Abbildung 3.4: Innenaufbau des Sensors

3.2 Kapazitäts-Messung

Die Kapazitäts-Messung wird mithilfe des 24 – Bit CDC AD7746 von Analog Devices, welcher nach dem Sigma-Delta-Verfahren arbeitet und in dieser Arbeit auch als CDC bezeichnet wird, durchgeführt. Dieser leitet eine Rechteckspannung in eine Kapazität und aus deren Antwort kann auf die Kapazität rückgeschlossen werden. Der Chip wird aufgrund seiner hohen Auflösung, seines geringen Rauschens und der möglichen 50 Hz Unterdrückung verwendet. Die einzelnen Messzeiten sind mit 62 ms gewählt, da es hierbei dank des integrierenden Verfahrens zu einer Unterdrückung der 50 Hz Störungen um 65 dB kommt. [28]

Beim Design ist es besonders wichtig, dass die Kapazitäten der Eingangs- und Ausgangs-Kanäle im Bezug auf die Masse klein gehalten werden, um den Fehler der Messung möglichst gering zu halten. Dies spielt insbesondere bei der Wahl der Schalter eine zentrale Rolle. Um die Referenzen und Elektroden einzeln durchschalten zu können, sind insgesamt fünf Chips des Typs ADG613 eingebaut. Jeder dieser Chips hat eine geringe parasitäre Kapazität zur Masse und vier Schalter im Inneren. Diese große Anzahl an Schaltern wird benötigt, um während einer Messung alle weiteren nicht verwendeten Referenzen und Elektroden auf ein fixes Potenzial (Masse) zu legen. Die Steuerung dieser Schalter erfolgt über den Mikrocontroller. Für zukünftige Untersuchungen besteht bei den Eingängen des CDC für alle Elektroden (diese befinden sich außerhalb des Gehäuses) die Möglichkeit, einen Filter gegen Störungen (z.B. gegen 50 Hz) einzubauen. Diese Filter sind im Rahmen dieser Arbeit nicht in Verwendung und werden überbrückt. Sie sind nur bei den Eingangsseiten der Kapazitäts- und Impedanz-Messschaltungen vorhanden, weil diese im Gegensatz zu den jeweiligen Ausgängen der Messschaltungen sehr hochohmig und damit anfälliger gegenüber Störungen sind. Des Weiteren werden die Filter vor den Schaltern eingebaut, um diese vor möglichen hohen Spannungen – verursacht durch Störquellen – zu schützen. [28]

Die zu messenden Elektroden werden im Kapitel 3.4 näher behandelt. Hier wird die Elektrodengeometrie so adaptiert, dass diese relativ gut in den Messbereich des CDC fällt. Es gibt zwei unterschiedliche Arten von Elektroden. Eine Elektrode für die Wasser- bzw. Eis-Unterscheidung, welche in einer Größenordnung von ungefähr 2 pF liegt und drei wesentlich kleineren Elektroden, welche für die Messung der Eisdicke herangezogen werden und

3 Systementwicklung

in der fF-Größenordnung liegen (gemessen mit einer LCR-Brücke). [28]

Es sind zusätzlich zwei Referenzkapazitäten in Gebrauch, um einen möglichst geringen Temperatur- und Langzeit-Drift zu erhalten. Beide sind als C0G ausgeführt. Diese Art der Keramikkondensatoren bieten den Vorteil, dass sie über den eingesetzten Temperaturbereich einen möglichst geringen Temperaturdrift von ± 30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ besitzen. Die Wahl der Referenzen orientiert sich an der jeweiligen Mitte eines Messbereichsfensters des CDC-Chips. Dies ist bei dem CDC ± 4 pF und kann mit einem integrierten CAPDAC erhöht werden. Da nur positive Kapazitäten gemessen werden, liegt eine Referenz bei 2 pF. Die zweite Referenz wird in diesem Bereich eigentlich nicht benötigt, ist aber für den höheren Wertebereich mit 6 pF ausgelegt. Des Weiteren ist es mit dem CDC-Chip möglich, die interne Temperatur zu messen. [28] [23]

Für zukünftige Versuche ist bei den Ausgängen des CDC zu den Elektroden ein Widerstand für die Messung des Ausgangsstromes vorgesehen. Dieser ist in der vorliegenden Arbeit überbrückt. Die Idee hinter dieser Strommessung ist, dass auf die Stromdifferenz zwischen Ausgangs- und Eingangs-Strom des CDC geschlossen werden kann. Wenn diese Differenz hoch ist, deutet dies auf einen anderen Strompfad zur Masse hin und kann beispielsweise für einen Wasserfilm auf der Elektrodenfläche sprechen, der einen dominanten Pfad zu der umliegenden Massefläche erzeugt. Damit könnte die gemessene Differenz helfen, Wasser und Eis besser zu unterscheiden.

3.3 Impedanz-Messung

Die Impedanz-Messung wird mithilfe des AD5933 von Analog Devices, in dieser Arbeit auch als IQ bezeichnet, durchgeführt. Es wird ein Sinussignal mit einer wählbaren Frequenz zu einer Impedanz geleitet und deren Antwort mithilfe eines 12 – Bit ADC gemessen. Dabei werden 1024 Messungen nacheinander durchgeführt. Daraufhin verarbeitet der Chip mithilfe einer diskreten Fouriertransformation die gewonnenen Daten, um daraus auf den Real- und den Imaginär-Anteil der Impedanz zu schließen. Der Chip ist unter anderem aufgrund seines messbaren Frequenzbereiches und des möglichen Impedanzbereiches in Verwendung. Um Messungen mit kleineren Frequenzen (~ 300 Hz bis ~ 5 kHz) zu ermöglichen, ist ein externer Takt mit 2 MHz verbaut. Für die höheren Messfrequenzen wird der interne Takt mit 16,776 MHz

3 Systementwicklung

verwendet. Wahlweise könnte für zukünftige Messungen ein externer Takt mithilfe des Mikrocontrollers zugeführt werden, um beispielsweise noch kleinere Frequenzen messbar zu machen. Von dieser Möglichkeit wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht Gebrauch gemacht. [29] [30] [31]

Beim Design ist es erneut wichtig, dass die Kapazitäten der Eingangs- und Ausgangs-Kanäle im Bezug auf die Masse klein gehalten werden, um den Fehler der Messung möglichst gering zu halten. Dies spielt insbesondere bei der Wahl der Schalter eine zentrale Rolle. Um die Referenzen und Elektroden einzeln durchschalten zu können, sind insgesamt drei Chips des Typs *ADG613* eingebaut. Jeder dieser Chips hat eine geringe parasitäre Kapazität zur Masse und vier Schalter im Inneren. Für die Schalter und Filter des Impedanz-Messverfahrens gelten dieselben Beschreibungen wie beim Kapazitiven-Messverfahren (siehe Kapitel 3.2).

Die Elektrode, die für dieses Verfahren eingesetzt wird, wird im Kapitel 3.4 näher beschrieben. Die Elektrodengeometrie ist so adaptiert, dass diese relativ gut in den Messbereich des IQ fällt. Beim IQ ist im Gegensatz zum CDC nur eine Elektrode für die Wasser- bzw. Eis-Unterscheidung, welche in einer Größenordnung von ungefähr 30 pF liegt, vorhanden (gemessen mit einer LCR-Brücke). Die größere Kapazität wird aufgrund des Impedanzbereiches des IQ gewählt. Sie liegt dadurch zwischen $\sim 10,6 \text{ M}\Omega$ bei 500 Hz und $\sim 53 \text{ k}\Omega$ bei 100 kHz und damit im empfohlenen Bereich des IQ. Aufgrund des großen Impedanzbereiches müssen die Messbereiche aufgeteilt werden. Hierfür werden zwei unterschiedlich große Rückkopplungswiderstände beim invertierenden Verstärker eingesetzt, welche über einen Schalter umgeschaltet werden können. Um die Ergebnisse weiter zu verbessern und einen größeren Impedanzbereich nützen zu können, werden zwei Operationsverstärker eingebaut. Das Verfahren benötigt Bauteile mit bekannten Werten, um bei der Datenauswertung auf die unbekanntenen Impedanzen rückschließen zu können. Diese müssen in derselben Konfiguration wie die unbekanntenen Impedanzen gemessen werden. Wegen des großen Dynamikbereiches sind zwei Widerstände ($100 \text{ k}\Omega$ und $1 \text{ M}\Omega$) mit einem relativ niedrigen Temperaturdrift von $\pm 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ im Einsatz, um über dem eingesetzten Temperaturbereich möglichst stabil zu bleiben. Die Software am Mikrocontroller macht bei jeder Messung und jeder Frequenz eine zusätzliche Messung der passenden Referenz. Die unterschiedlichen Verstärkungsstufen und weitere Konfigurationen werden von der Software passend zur jeweiligen Messfrequenz eingestellt. Es sei angemerkt, dass höhere Messfrequenzen schneller und damit energie-

3 Systementwicklung

sparender gemessen werden können. Des Weiteren ist es mit dem IQ-Chip möglich, die interne Temperatur zu messen. [29] [30] [31]

Für zukünftige Versuche ist beim Ausgang des IQ zur Elektrode ein Widerstand für die Messung des Ausgangsstromes vorgesehen. Dieser ist in der vorliegenden Arbeit überbrückt. Die Idee hinter dieser Strommessung ist, dass auf die Stromdifferenz zwischen Ausgangs- und Eingangs-Strom des IQ geschlossen werden kann. Wenn diese Differenz hoch ist, deutet dies auf einen anderen Strompfad zur Masse hin und kann beispielsweise für einen Wasserfilm auf der Elektrodenfläche sprechen, der einen dominanten Pfad zu der umliegenden Massefläche erzeugt. Damit könnte die gemessene Differenz helfen, Wasser und Eis besser zu unterscheiden.

3.4 Elektroden

Die Elektroden-Anordnungen, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, stammen von [32]. Sie werden für die vorliegende Arbeit teilweise übernommen oder auf Basis der Erfahrungen der ersten Hardwareversion geringfügig geändert. Unter Abbildung 3.5 sind die drei separaten Elektroden und der äußere Schutzring – welcher mit Masse verbunden ist – dargestellt. Die Elektroden sind über Durchkontaktierungen mit der gegenüberliegenden Seite der Platine verbunden. Für die Elektroden gilt folgende Unterteilung (die Kapazitäten werden dabei mit einer LCR-Brücke gemessen):

- Elektrode oben: Elektrode für die Impedanz-Messung, angedacht für die Wasser-Eis-Unterscheidung. Sende- und Empfangs-Elektroden immer abwechselnd, von links beginnend mit der Sende-Elektrode. Die Kapazität beträgt im trockenen Zustand ~ 31 pF.
- Elektrode mittig: Elektrode für die Kapazitäts-Messung, angedacht für die Eisdickenmessung. Links ist die Sende-Elektrode, die drei weiteren Flächen bilden drei separate Empfangs-Elektroden. Jene neben der Sende-Elektrode ist für die Messung dünnerer Eisschichten angedacht, die zweite für mittlere Distanzen und die äußerste für die größten Eisdicken. Die Kapazität beträgt im trockenen Zustand mit der Empfangs-Elektrode links: ~ 3 fF, mittig: ~ 3 fF, rechts: $\sim 3,4$ fF.

3 Systementwicklung

- Elektrode unten: Elektrode für die Kapazitäts-Messung, angedacht für die Wasser-Eis-Unterscheidung. Sende- und Empfangs-Elektroden immer abwechselnd, von links beginnend mit der Sende-Elektrode. Die Kapazität beträgt im trockenen Zustand $\sim 1,3$ pF.

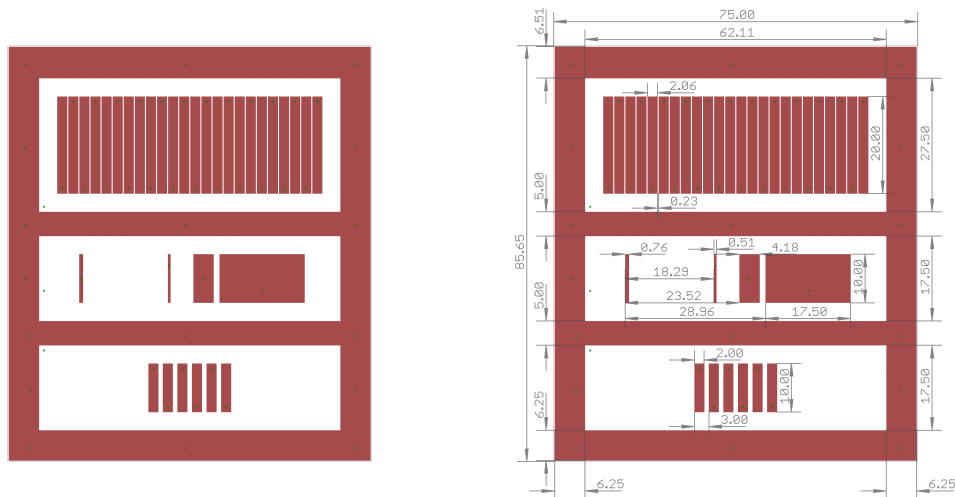


Abbildung 3.5: (links) drei unabhängige Messelektroden umgeben von Massefläche, (rechts) mit Maßen in mm

Die Elektroden werden sequentiell angesteuert. Während ein Sende-Empfangs-Paar aktiv ist, sind die restlichen Elektroden über Schalter mit Masse verbunden.

In Abbildung 3.7 ist der Lagenaufbau der Leiterplatte dargestellt. Im vorliegenden Aufbau wird die, unter 3.5 dargestellte, Elektrode in der obersten Kupferfläche erstellt. Diese wird von der obersten Lötstoppschicht bedeckt. Danach folgt eine in der Abbildung nicht mehr ersichtliche Schicht Epoxidharzkleber, der eine gute Verbindung zu einer ~ 400 μm dicken Glasscheibe (Schutzglasscheibe mit innen liegender Plastikfolie) herstellt. Diese Glasscheibe wird als Isolator eingesetzt, um sicherzustellen, dass keine Verbindung zwischen Messobjekt (Eis/Wasser) und den Durchkontaktierungen der Elektrode besteht. Des Weiteren ist Glas gut geeignet, um die Elektrode vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen.

Von außerhalb des Sensors nach innen betrachtet ergibt sich folgender Aufbau: eigentliches Messobjekt (Eis / Wasser / Luft), Glas, Epoxidharzkleber,

3 Systementwicklung

Lötstoppschicht, eigentliche Fläche mit Elektrode wie unter Abbildung 3.5 abgebildet, zwei Prepreg-Lagen, eine zweite leere Kupferlage, der Leiterplattenkern, eine Kupferfläche mit Massefläche wie unter Abbildung 3.6 dargestellt, erneut zwei Prepreg-Lagen und eine Kupferfläche, welche die Verbindung zu den SMD-Stiftleisten herstellt, die in weiterer Folge zur Messplatine führen (siehe Abbildung 3.10).

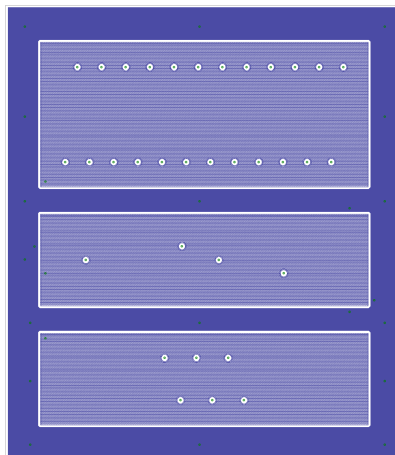


Abbildung 3.6: Fläche unter der Elektrode

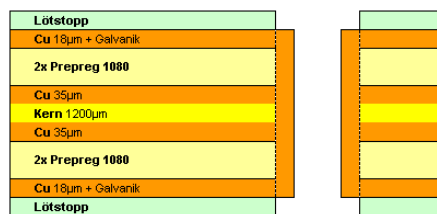


Abbildung 3.7: Lagenaufbau der FR4 Leiterplatte [33]

Die in Abbildung 3.6 dargestellte äußere Fläche ist mit Masse verbunden. Die direkt unter den Elektroden liegenden Flächen können wahlweise mit Masse oder der jeweiligen Sendelektrode verbunden oder ohne fixes Potenzial verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit sind diese Flächen immer mit Masse verbunden, die anderen Varianten können für zukünftige Messungen verwendet werden.

3 Systementwicklung

In Abbildung 3.8 ist die Elektrode von außen zu sehen.

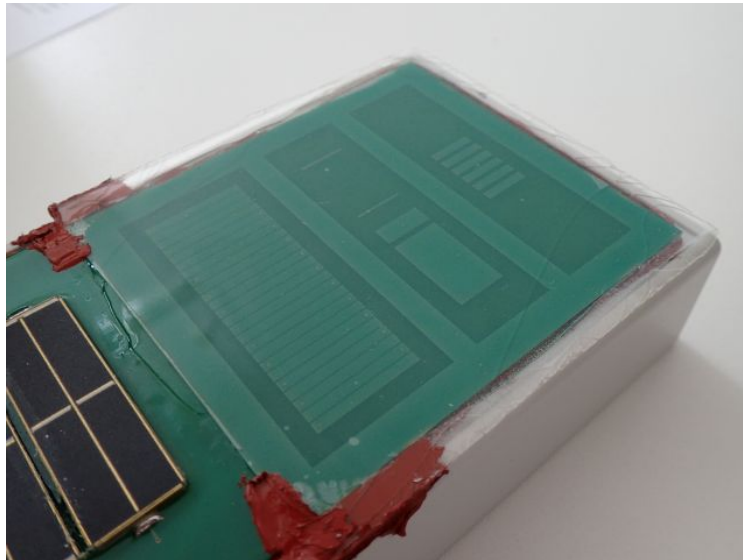


Abbildung 3.8: Foto der Elektrode mit Glasschutz

3.5 Energieversorgung

Die Energieversorgung ist in Abbildung 3.3 großteils gelb dargestellt. In der aktuellen Ausführung gibt es drei Möglichkeiten, den Sensor mit Energie zu versorgen. Der mögliche Spannungsbereich liegt zwischen 2,7 V (begrenzt durch die Messverfahren) und 3,6 V (begrenzt durch den externen Takt).

- Die erste Möglichkeit besteht darin, eine externe Versorgung zu wählen. In diesem Fall werden die Solarzellen, der Chip für die Steuerung der autarken Energieversorgung – im Weiteren auch als Harvester bezeichnet – und der Akku nicht verwendet.
- Eine zweite Variante besteht darin, die Versorgung direkt von dem Li-Ionen Akku zu beziehen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Versorgungsbereich nicht über- und unterschritten wird. Da Li-Ionen meist in einem Bereich von $\sim 3\text{ V}$ bis $\sim 4,2\text{ V}$ verwendet werden, muss

3 Systementwicklung

dafür gesorgt sein, dass der Akku nicht über 3,6 V geladen wird. Der Nachteil dieser Variante liegt in der schwankenden Versorgungsspannung und in der Tatsache, dass nicht die volle Kapazität des Akkus genutzt werden kann. Der große Vorteil liegt in einer sehr rauscharmen Versorgung. Aus diesem Grund wird diese Art der Versorgung bei allen Wasser- bzw. Eis-Messungen angewendet, um die Ergebnisse mit dem geringsten Rauschanteil zu erhalten (der Akku ist am Anfang der Messung auf 3,6 V geladen). [34]

- Die dritte und letzte Möglichkeit, welche für den eigentlichen Betrieb angedacht ist, ist die Versorgung mit einem DC/DC-Wandler aus dem Akku. Der DC/DC-Wandler befindet sich teilweise im Harvester-Chip, welcher die Akkuspannung mithilfe eines Abwärts- bzw. Aufwärts-Wandlers auf 3,3 V regelt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die konstante Versorgungsspannung und dass die gesamte Kapazität des Akkus ausgenutzt werden kann. Ein Nachteil ist das – durch den Wandler bedingte – höhere Rauschen in der Versorgungsspannung. [35]

Der Akku ist mit einer Kapazität von ~ 2600 mAh ausgestattet und enthält als zusätzliche Absicherung eine integrierte Schutzbeschaltung gegen zu hohe Ströme, Tief- und Überladung. Ziel ist es, dass der Akku das System bei entsprechender Abtastrate über ein Jahr lang versorgen kann. [34]

Da das System für einen Zeitraum von mehreren Jahren ausgelegt ist, sind zwei Solarzellen – welche in Serie geschaltet sind – mit einer maximalen Spitzenleistung von ~ 178 mW in Verwendung. Diese laden bei gegebenen Lichtverhältnissen den Akku auf. Die hierfür notwendige Ladeelektronik befindet sich im Harvester-Chip. Hierzu wird abermals ein DC/DC-Wandler (Abwärts- und Aufwärts-Wandler) verwendet. Der Chip verwendet ein spezielles Verfahren, um den optimalen Leistungspunkt der Solarzellen zu nutzen. Dabei wird alle ~ 14 s die Last getrennt und die Leerlaufspannung der Solarzellen gemessen, welche je nach Lichtverhältnissen bis zu ~ 5 V erreichen kann. Ausgehend von der Leerlaufspannung regelt der Chip die danach wieder zugeschaltete Last, indem sich $\sim 80\%$ der Leerlaufspannung einstellen. Dadurch werden die Solarzellen in der Nähe des optimalen Leistungspunktes betrieben. Des Weiteren kann der Mikrocontroller den Harvester ein- und ausschalten sowie den Zustand des Akkus abfragen. [35] [36] [21]

Um die Versorgungsspannung zu glätten, sind große Stützkondensatoren eingebaut. Diese sind bewusst groß dimensioniert, um bei eventuellen Störungen

3 Systementwicklung

der Messungen durch den DC/DC-Wandler die Versorgungsspannung für die Dauer der Messung (oder Teilen davon) zu erhalten, während der DC/DC-Wandler für diesen Zeitraum abgeschaltet werden kann.

Die Kapazitäts- und Impedanz-Messschaltungen lassen sich unabhängig voneinander mithilfe zweier Schalter vom Mikrocontroller mit Spannung versorgen. Dies hat den Vorteil, dass der vom System benötigte Ruhestrom stark reduziert wird, indem die nicht benötigten Messsysteme vollständig ausgeschaltet werden können.

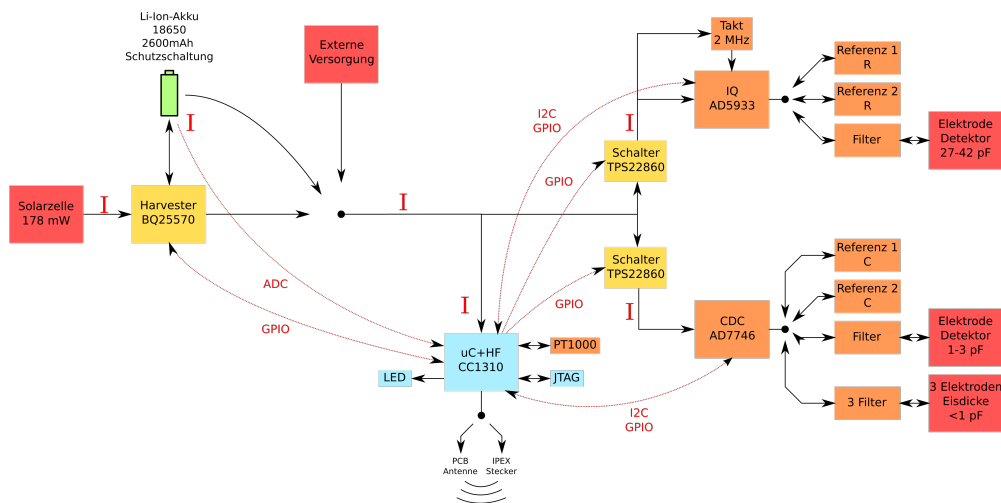


Abbildung 3.9: Blockschaltbild des Sensors mit Datenverbindungen und Strom-Messpunkten

3.6 Controller und Kommunikation

Der Controller und die Kommunikationspfade sind im Blockschaltbild (Abbildung 3.9) blau dargestellt. Als zentrale Steuereinheit wird der Mikrocontroller CC1310 von Texas Instruments mit integrierter Hochfrequenzschnittstelle, aufgrund des niedrigen Stromverbrauches und der eingebauten Schnittstellen, verwendet. [37]

Der Controller steuert mithilfe von GPIO-Pins den Harvester, den er damit ein- und ausschalten kann. Des Weiteren kann die 3,3V Versorgungsspan-

3 Systementwicklung

nung vom Harvester ein- und ausgeschaltet werden und es kann überprüft werden, ob sich der Akku in einem guten Ladezustand befindet. Wie bereits erwähnt, kann die Versorgungsspannung für die einzelnen Messschaltungen separat über GPIO-Pins gesteuert werden. Mit den Messschaltungen wird über die I2C-Schnittstelle und diversen GPIO-Pins – welche großteils zur Steuerung von Schaltern verwendet werden – kommuniziert. Zusätzlich zu den Temperaturmessungen an den Messschaltungen ist ein *PT1000* direkt auf der Innenseite der Elektrodenplatine eingebaut (siehe Abbildung 3.10). Der *PT1000*, welcher die Temperatur nahe an den Elektroden misst, ist über einen GPIO-Pin – aufgrund des sich sonst ergebenden hohen Stromverbrauches – einschaltbar und mithilfe eines Spannungsteilers und dem internen ADC messbar. Nach einem ähnlichen Prinzip wird auch die Akkuspannung gemessen.



Abbildung 3.10: *PT1000* (in der Mitte sichtbar) und die elektrischen Verbindungen – realisiert mit Stiftleisten – auf der Innenseite des Gehäuses (angebracht auf der Rückseite der Elektrodenplatine).

Der Mikrocontroller wird über eine JTAG-Schnittstelle angesprochen und programmiert. Als Schnittstelle nach außen für den laufenden Betrieb können zwei SMD-Leds und die Funkkommunikation verwendet werden, wobei erstere aufgrund des zu hohen Stromverbrauches und des – im Normalfall – geschlossenen Gehäuses nicht zum Einsatz kommen. Für die Funkkommunikation ist das ISM 868 MHz Band mit einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung in Verwendung. Dieses Frequenzband hat sich in der Vergangenheit als robust gegen ein raues Umfeld erwiesen und hat eine höhere Reichweite sowie bes-

3 Systementwicklung

sere Ausbreitungseigenschaften als höhere Frequenzbänder, wie zum Beispiel das 2,4 GHz Band [17] [25] [26] [19]. Für die Hochfrequenzschnittstelle gibt es zwei auswählbare Antennen. Variante eins ist eine PCB-Antenne – welche auch beim Launchpad in Verwendung ist – und Variante zwei ist ein IPEX-Stecker für den Anschluss externer Antennen. Im Rahmen dieser Arbeit ist nur die PCB-Antenne in Gebrauch. Die Sendeleistung beträgt ~ 12 dBm (kann aber über die Software verändert werden). [27]

3.7 Software

In diesem Unterkapitel wird nur oberflächlich auf die Software eingegangen, da diese nicht im Hauptfokus der vorliegenden Arbeit liegt. Die Software, welche für den Sensor und die Basisstation in der Programmiersprache C geschrieben ist, wird speziell für diese Anwendung entwickelt. Es sind dabei verschiedene Beispielprogramme aus anderen Quellen mit eingeflossen.

3.7.1 Sensor

Ziel bei der Sensor-Software-Entwicklung ist es, alle Messungen zu steuern, diese möglichst genau durchzuführen, die Daten sicher zu übertragen und wenig Energie zu benötigen.

Im Ruhezustand des Sensors ist nur die Echtzeituhr (RTC) in Betrieb, alle anderen Komponenten des Mikrocontrollers sind im Stromsparmmodus, um möglichst wenig Energie zu verbrauchen. Nach einer definierten Zeit (Abtastrate) weckt die Echtzeituhr das restliche System auf. Dieses überprüft, ob im FIFO-Puffer freier Speicher für neue Messwerte vorhanden ist. Sollte kein Platz mehr vorhanden sein, bedeutet das, dass der Sensor schon längere Zeit keine erfolgreiche Kommunikation zur Basisstation aufbauen konnte. Aufgrund dieser Tatsache versucht der Sensor nun alte Datenpakete zu übertragen, ohne neue Messungen durchzuführen. Bei der späteren Auswertung am Computer fallen solche Übertragungsfehler aufgrund fehlender Messnummern auf. Ist noch Platz im FIFO-Puffer vorhanden – was die Regel sein sollte – ergibt sich folgender Ablauf:

3 Systementwicklung

- Temperaturmessung mithilfe des *PT1000*
- Temperaturmessung mithilfe des *IQ*
- Kapazitäts-Messung für zwei Referenzen und vier Elektroden
- Impedanz-Messung bei 66 Messfrequenzen zwischen 300 Hz und 100 kHz, jeweils für die passende Referenz und die Elektrode
- Spannungsmessung des Li-Ionen Akkus
- Datenübertragung zur Basisstation (563 Bytes pro Messung, welche in 5 Teilpaketen übertragen werden; maximale Größe pro Teilpaket: 125 Byte)

Ein Datenpaket ist folgendermaßen aufgebaut:

- Sensor ID (falls mehrere Sensoren verwendet werden)
- fortlaufende Messnummer
- Temperaturwerte des *PT1000*
- Temperaturwerte des *IQ*
- Kapazitätswerte
- Impedanzwerte
- Akkuspannung

Bei der Datenübertragung sendet der Sensor zunächst eine Messung (diese entspricht einem Datenpaket, welches wiederum – aufgrund der Datengröße – in mehrere Teilpakete unterteilt sein kann). Nach dem Sendevorgang schaltet der Sensor für 5 ms auf „Empfangen“, um auf eine Empfangsbestätigung der Basisstation zu warten. Sollte keine Bestätigung erfolgen, bleiben die Messwerte im FIFO-Puffer und das System legt sich bis zum nächsten Zyklus schlafen. Sollte eine Bestätigung von Teilpaketen empfangen werden, – es sind möglicherweise nicht alle Teilpakete empfangen worden – werden diese Informationen gespeichert und das System legt sich schlafen. Beim nächsten Sendevorgang überträgt der Sensor dann nur die fehlenden und das letzte Teilpaket (letzteres aus Synchronisationsgründen). Sollte eine Bestätigung einlangen, dass alle Teilpakete erfolgreich übertragen worden sind, gibt der Sensor den FIFO-Speicher frei und überträgt ein weiteres Datenpaket (sofern eines vorhanden ist).

In zukünftigen Softwareversionen kann der Ablauf, um den Stromverbrauch weiter zu senken, beispielsweise folgendermaßen abgeändert werden: Nach

3 Systementwicklung

dem Aufwachen misst der Sensor erstmals die Temperatur, sollte diese eindeutig im positiven Bereich liegen – also zum Beispiel über 5°C – überträgt der Sensor nur die Temperatur zur Basisstation, ohne weitere Messungen durchzuführen (Eis kann durch die hohe Temperatur ausgeschlossen werden). Sollte die Temperatur unter diesem Schwellwert liegen, wird mit dem IQ-Verfahren gemessen. Stellt sich heraus, dass Eis vorhanden ist oder sein könnte, wird zusätzlich mit dem CDC-Verfahren gemessen (kann auch gleich herangezogen werden). Des Weiteren kann die Anzahl der Messfrequenzen beim IQ-Verfahren auf ein Minimum reduziert werden (zum Beispiel auf vier Messfrequenzen). Durch diese Verfeinerungen könnte – je nach Einsatzgebiet – ein Großteil der benötigten Energie eingespart werden.

3.7.2 Basisstation

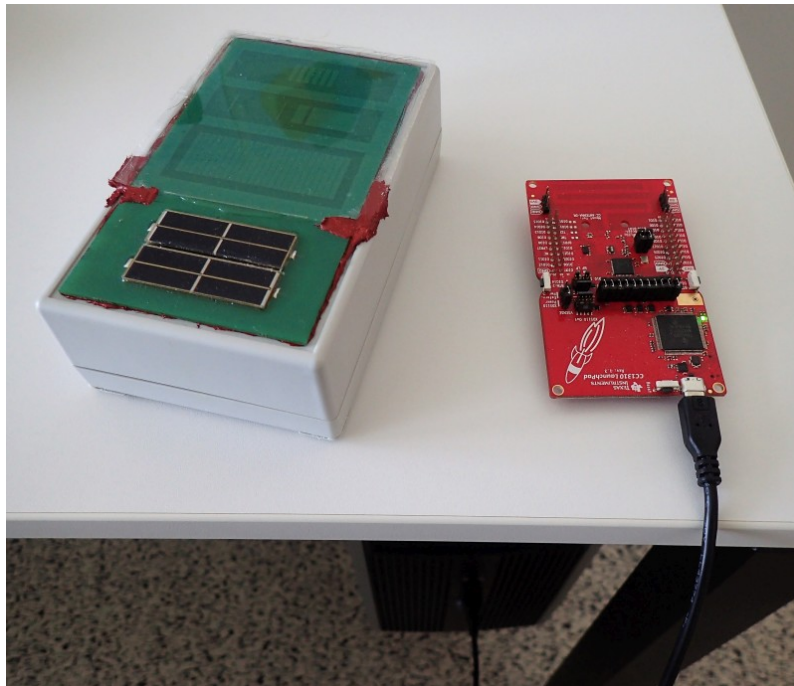


Abbildung 3.11: Gesamtaufbau des Systems. Sensor (links im Bild), Basisstation (rechts im Bild) und der Computer (teilweise unten im Bild).

3 Systementwicklung

Die Basisstation ist in Abbildung 3.11 dargestellt und hat einen einfachen Software-Ablauf. Die meiste Zeit ist ihre Hochfrequenzschnittstelle auf „Empfang“ geschaltet, um ein aufkommendes Datenpaket vom Sensor sofort zu verarbeiten. Der höhere Stromverbrauch durch das ständige Empfangen stellt bei der Basisstation kein Problem dar. Ein Datenpaket kann aufgrund seiner Größe – im eigens für geringen Stromverbrauch optimierten Protokoll – aus mehreren Teilpaketen bestehen. Wenn ein oder mehrere Teilpakete empfangen werden, bestätigt die Basisstation nach dem letzten Teilpaket mit einem kurzen Sendevorgang, welche Teilepakete eines Datenpaketes korrekt empfangen worden sind. Sollte ein Datenpaket vollständig sein, wird dieses um RSSI-Empfangsinformationen – welche ein Maß für die Signalqualität der Funkverbindung darstellen – ergänzt und über eine virtuelle serielle Schnittstelle (USB) zum Computer geschickt. Es ist möglich, dass die Basisstation Datenpakete doppelt empfängt (Bestätigung der Basisstation zum Sensor geht verloren), dies kann leicht durch die fortlaufenden Messnummern berücksichtigt werden.

3.7.3 Computer

Am Computer nimmt ein Programm die Daten der virtuellen seriellen Schnittstelle entgegen, versieht sie mit aktuellem Datum und Uhrzeit und speichert sie in eine Textdatei, woraufhin diese weiterverarbeitet werden können. Im Anhang kann eine Programmliste eingesehen werden.

4 Eis- und Wasser-Messungen

In diesem Kapitel wird auf verschiedene Eis- und Wasser-Messungen eingegangen und die Ergebnisse werden diskutiert. Die unterschiedlichen Eis-Arten und möglichen Eis- und Wasser-Konstellationen erfordern eine Vielzahl an Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise abgedeckt werden.

Im Fokus steht dabei die Wasser-Eis-Unterscheidung mit den entsprechenden Elektroden, welche in folgenden Messungen vorrangig behandelt wird:

- **4.1 Testmessung mit Nachbildungen:** In diesem Szenario wird mit Kunststoffstücken und nassem Papier versucht, Eis und Wasser nachzubilden und die im Kapitel 2 beschriebenen Effekte zu erkennen.
- **4.2 Vereisung von Wassertropfen:** Bei diesem Test werden einzelne Wassertropfen vereist und anschließend wieder aufgetaut. Hierbei treten vernachlässigbar kleine Verschiebestrome zu den umliegenden Masseflächen auf.
- **4.3 Vereisung eines Wasserfilms:** Bei diesem Szenario treten größere Verschiebestrome zu den umliegenden Masseflächen auf. Dabei wird eine Wasserfläche vereist und anschließend wieder aufgetaut. Dieses Szenario ist wichtig, um den Einfluss der Verschiebestrome auf die Wasser-Eis-Unterscheidung zu untersuchen.
- **4.4 Vereisung unterschiedlicher Wassertropfen:** In diesem Szenario werden zunächst einzelne und danach mehrere Wassertropfen in unterschiedlicher Größe vereist. Daraufhin werden immer größer werdende Wasser-Eis-Flächen vereist. Dieser Test ist wichtig, um möglichst viele unterschiedliche Eis- und Wasser-Konstellationen zu untersuchen.
- **4.5 Dicker werdende Eisschicht:** Bei diesem Test werden immer dicker werdende Schichten Eis erzeugt. Dies ist relevant, um das Verhalten der Elektroden bei dickeren Eisschichten zu untersuchen.

4 Eis- und Wasser-Messungen

Ein weiterer Fokus liegt auf der Eisdicken-Messung mit den entsprechenden Elektroden, welche in folgenden Messungen vorrangig behandelt wird:

- **4.6 Eisdicken-Messung 1:** In diesem Szenario wird etappenweise Wasser aufgetragen und vereist, um dicke Eisschichten zu erhalten. Dabei kommt es zu einer punktförmigen Eisspitze im Zentrum der Elektrode.
- **4.7 Eisdicken-Messung 2:** Um eine gleichmäßig dicke Eisschicht über den Elektroden zu erhalten, wird bei diesem Test etappenweise ein Wasserfilm aufgetragen und vereist.
- **4.8 Messung bei Raureif:** Bei diesem Test werden dickere Schichten Raureif auf der Elektrode aufgetragen, um das Verhalten des Sensors auf eine andere Eis-Art zu untersuchen.

Um die Übersicht zu bewahren, welche Elektroden bei welcher Messung eingesetzt werden, sind diese in den jeweiligen Bilderserien im Bild (a) in rot markiert und/oder im Abbildungstext beschrieben. Zusätzlich ist in Abbildung 4.1 eine Übersicht der Elektroden dargestellt.

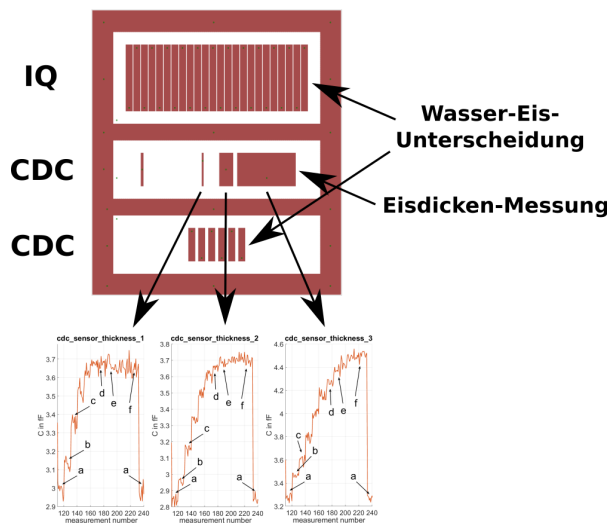


Abbildung 4.1: Übersicht der Elektroden. Die verwendeten Messverfahren zu den drei Elektroden sind jeweils links dargestellt. Rechts ist der angedachte Verwendungszweck zugeordnet. Die Elektrode zur Eisdicken-Messung ist in drei weitere Subelektroden unterteilt. In allen weiteren Messungen wird die mit den Pfeilen dargestellte Reihenfolge eingehalten.

4.1 Testmessung mit Nachbildungen

In diesem Unterkapitel wird versucht – mithilfe von verschiedenen dicken Kunststofffolien sowie Kunststoffstücken und nassem Papier – Eis und Wasser nachzubilden. Die Kunststoffstücke haben eine ähnliche Permittivität wie Eis bei höheren Frequenzen. Mit nassem Papier wird Wasser in verschiedenen Schichtdicken nachgebildet. Des Weiteren wird mit Wassertropfen bzw. Wasserflächen in unterschiedlicher Anzahl und Größe das Sensorverhalten untersucht. Insgesamt wird bei diesem Test versucht, die unter Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen zu verifizieren und damit die Messung auf Plausibilität zu überprüfen.

In weiterer Folge wird nur auf die Messwerte vom CDC-Verfahren für die Elektroden für die Wasser-Eis-Unterscheidung und für die Eisdicken-Messung eingegangen. Die Ergebnisse der Elektrode, gemessen nach dem IQ-Verfahren, werden aus Platzgründen hier nicht extra dargestellt, da diese der Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung nach dem CDC-Verfahren sehr ähnlich sind. Dies lässt sich durch das – im vorliegenden Test – fehlende Eis und die Frequenzunabhängigkeit der Permittivität von Kunststoff und nassem Papier – bei konstanten Temperaturen – erklären.

Beschreibung	Höhe in mm
dünne Kunststofffolie	0,15
dünnes Kunststoffstück	2,00
dickes Kunststoffstück	3,80
trockenes Papier	0,10

Tabelle 4.1: Schichtdicken der Materialien

4 Eis- und Wasser-Messungen

Wie in Abbildung 4.2 ersichtlich ist, wird bei diesem Testszenario die kleinste Kapazität bei einer nicht bedeckten Elektrode gemessen (a). Bei einer dünnen Kunststoffolie, die genau über der Elektrode und nicht darüber hinaus positioniert ist, erhöht sich die Kapazität infolge der größeren Permittivität von Kunststoff (b). Werden weitere Kunststoffolien aufgetragen, erhöht sich die Kapazität zunächst weiter (c). In (d) sind statt der Folien dickere Kunststoffstücke (2 mm) in Verwendung, dadurch kommt es zu einem Anstieg der Kapazität. In (e) und (f) wird der – in den Grundlagen (siehe Kapitel 2) beschriebene – Effekt sichtbar, dass die Kapazität ab einer gewissen Schichtdicke infolge der weitläufigeren Verteilung der Verschiebestrome abnimmt.

In Abbildung 4.3 sind die Ergebnisse der CDC-Elektroden zur Eisdickenmessung dargestellt. Wie erwartet, liegen die Kapazitätswerte wesentlich unter denen der Elektroden zur Wasser-Eis-Unterscheidung und die Signale weisen dadurch ein schlechteres SNR (Signal-zu-Rausch-Verhältnis) auf.

Bei diesem Test sind Kunststoffstücke in einer maximalen Dicke von ~ 31 mm aufgestapelt. In (a) ist der nicht bedeckte Zustand zu sehen. Mit einem Kunststoffstück erhöht sich – wie erwartet – die Kapazität (b). Anders als bei der CDC-Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung wird der Kapazitätswert ab zwei Kunststoffstücken (b)(c) noch nicht kleiner. Dies entspricht den Erwartungen, da die Verteilung der Verschiebestrome – mit einer größeren Distanz zwischen Sender- und Empfänger-Elektrode – zunächst noch einen positiven Einfluss auf die Kapazität hat. So ist auch beim vorliegenden Testszenario ersichtlich, dass die erste Eisdicken-Empfänger-Elektrode, welche auch am nächsten beim Sender liegt, als erste keine Kapazitätsvergrößerung verzeichnet. Danach folgt die mittlere Elektrode und zuletzt die am weitesten entfernte Elektrode (d)(e)(f). Diese Effekte sind erwünscht, um die jeweilige Elektrode bei entsprechender Eisdicke anzuwenden.

In Abbildung 4.4 ist die größere Kapazitätsänderung zwischen (a) und (b), welche sich durch die wesentlich größere Permittivität infolge des nassen Papiers ergibt, zu erkennen. Die Kapazität der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung steigt bis zur zweiten Papierschicht an, danach fällt sie bei dickeren Schichten ab. Bei den Elektroden zur Eisdicken-Messung sinkt die Kapazität bereits nach einer Papierschicht ab.

In Abbildung 4.5 und 4.6 sind die Ergebnisse von in Anzahl und Größe unterschiedlichen Wassertropfen zu sehen. Hier ist ersichtlich, dass die CDC-

4 Eis- und Wasser-Messungen

Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung – im Gegensatz zur Eisdicken-Elektrode – bei größeren Wassertropfen nicht an Kapazität verliert. Dies lässt sich durch (f) begründen. Wie ersichtlich ist, ist der Wassertropfen bei der Elektrode zur Eisdicken-Messung so breit, dass er sich mit der Massefläche rund um die Elektrode leicht überdeckt. Dadurch kommt es zu einer Änderung der Verschiebestrome in Richtung Massefläche und damit zu einer kleineren Kapazität.

Der Effekt der kleiner werdenden Kapazität kann, wie in Abbildung 4.7 ersichtlich, mit größeren Wasserfilmen gezeigt werden. Hierbei ist zu sehen, dass die Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung bei größeren Wasserfilmen – welche auch die äußeren Masseflächen überdecken – eine kleinere Kapazität aufweist als im trockenen Zustand. Dies wird im Kapitel 2 dadurch erklärt, dass die Verschiebestrome Richtung Massefläche größer werden und die Kapazität in weiterer Folge unter die Kapazität im trockenen Zustand fällt. Mit größeren Wasserfilmen nimmt die Kapazität weiter ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Kapazität bei der Eisdicken-Elektrode bei größeren Wasserfilmen zwar ab, allerdings fällt sie nicht unter die Kapazität im trockenen Zustand. Dies lässt sich durch die unterschiedliche Elektrodengeometrie erklären. Die Sende-Elektrode bei der Eisdicken-Messung ist sehr schmal und bietet den Verschiebestromen dadurch vermutlich einen nicht so optimalen Koppelpfad zur Massefläche, wie dies bei den wesentlich breiteren und öfter vorkommenden Sende-Elektroden zur Wasser-Eis-Unterscheidung der Fall ist.

Es kann gezeigt werden, dass die Kapazität beim Auftragen von Kunststoff oder nassem Papier auf die Elektrodenfläche aufgrund der Erhöhung der Permittivität ansteigt und dass die Kapazität bei dickeren Schichten ein Maximum erreicht und danach wieder abnimmt. Das Maximum ist abhängig von der Distanz zwischen Sender- und Empfänger-Elektrode. Ist die Distanz größer, so tritt das Maximum der Kapazität erst bei dickeren Schichten auf. Nasses Papier lässt dieses Kapazitätsmaximum aufgrund der höheren Permittivität schon bei viel dünneren Schichten entstehen.

Bei großflächig über der Elektrode aufgetragenem Wasser, welches auch die umliegenden Masseflächen überdeckt, wird aufgrund der Zunahme der Verschiebestrome in Richtung Masse eine kleinere Kapazitäten gemessen.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse gut mit den Grundlagen in Kapitel 2 überein.

4 Eis- und Wasser-Messungen

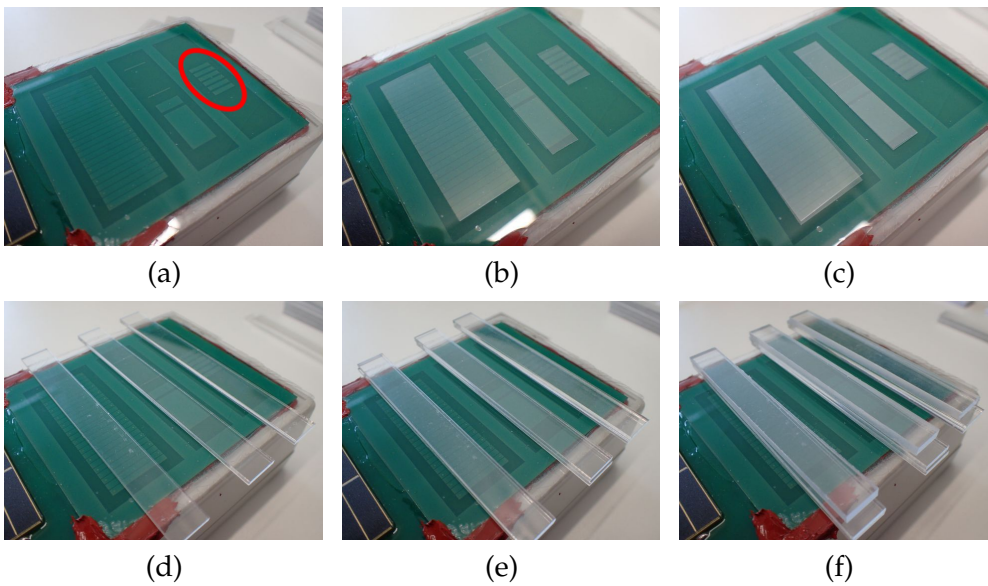
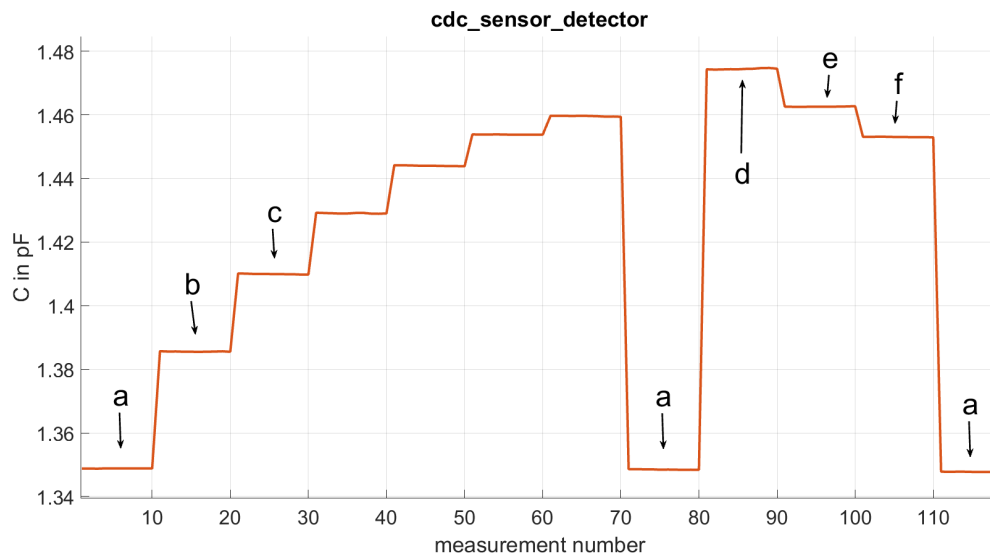


Abbildung 4.2: Messelektroden mit Kunststofffolien und Kunststoffstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

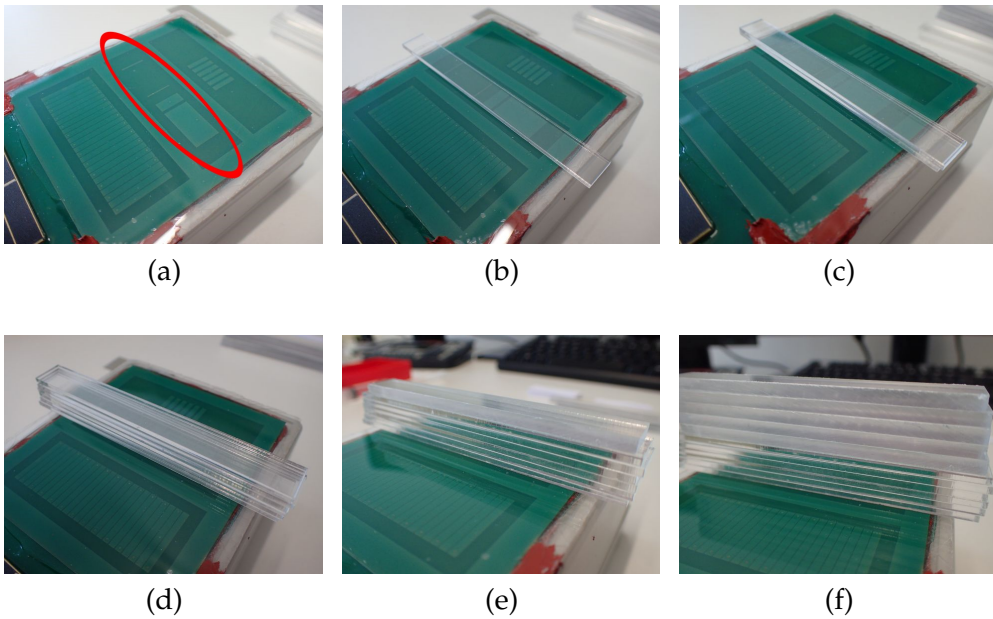
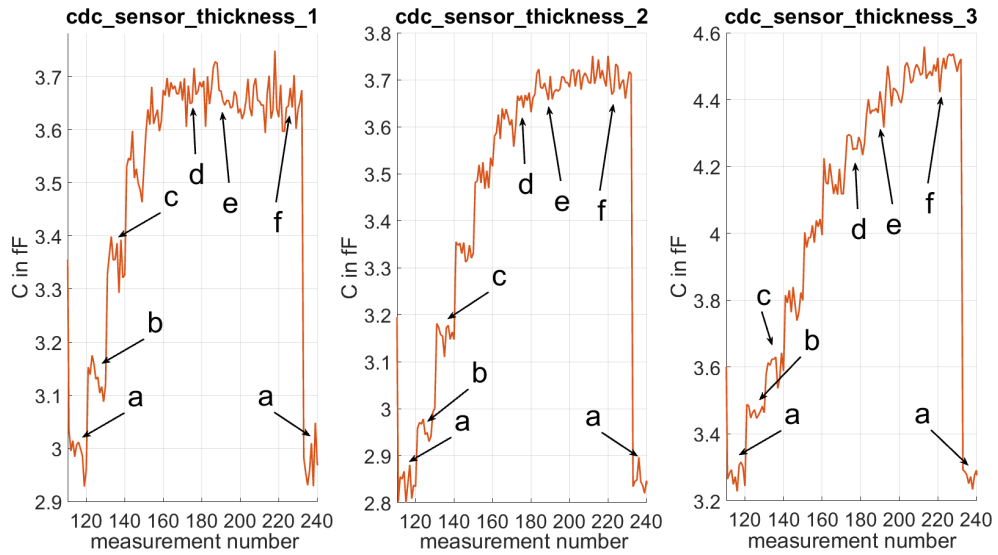


Abbildung 4.3: Messelektrode mit Kunststoffstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte. Bei den dünneren Kunststofffolien kann keine nennenswerte Änderung festgestellt werden.

4 Eis- und Wasser-Messungen

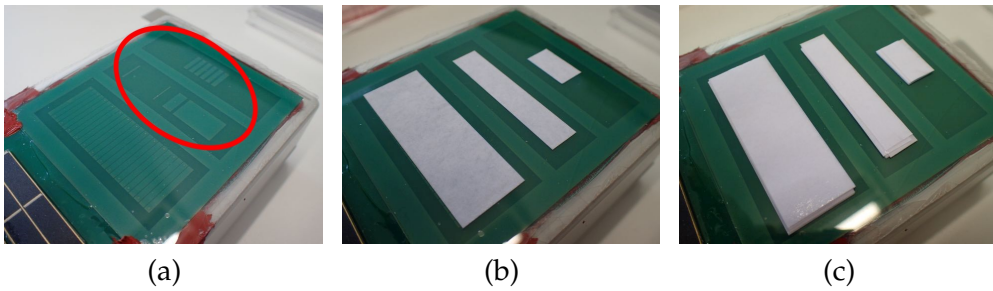
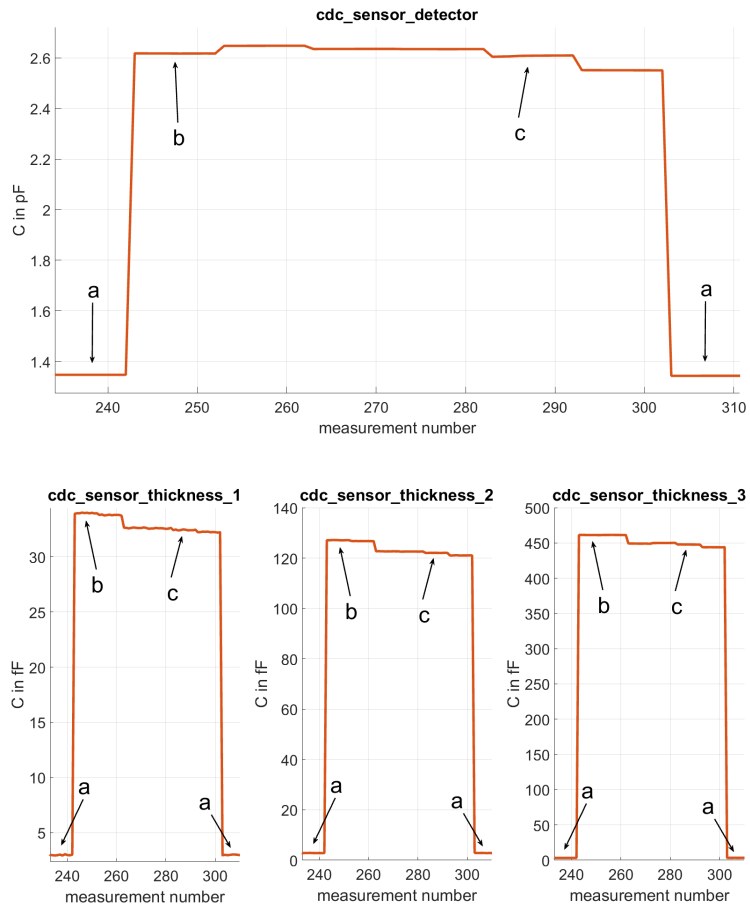


Abbildung 4.4: Messelektroden mit nassen Papierstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (oben) und die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (unten) jeweils bei Raumtemperatur (im Bild (a) sind die Elektroden rot markiert, dabei ist die Elektrode rechts oben (Wasser-Eis) und links unten (Eisdicke) zu sehen). Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

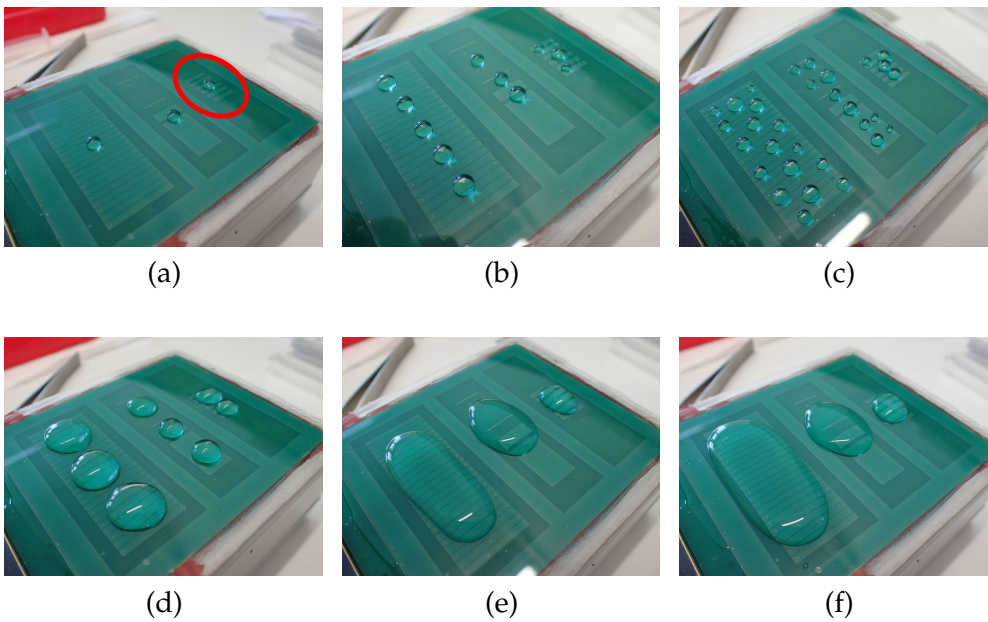
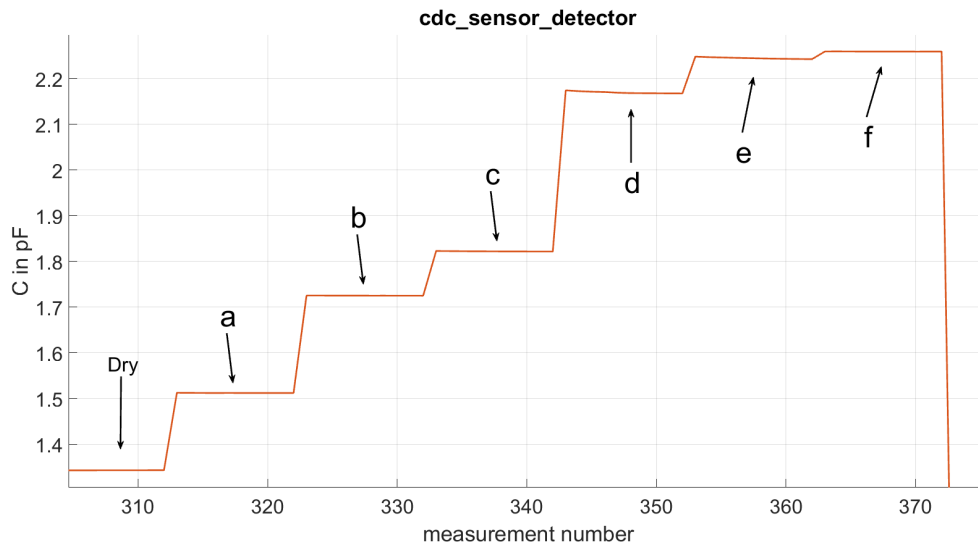


Abbildung 4.5: Messelektroden mit Wassertropfen. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

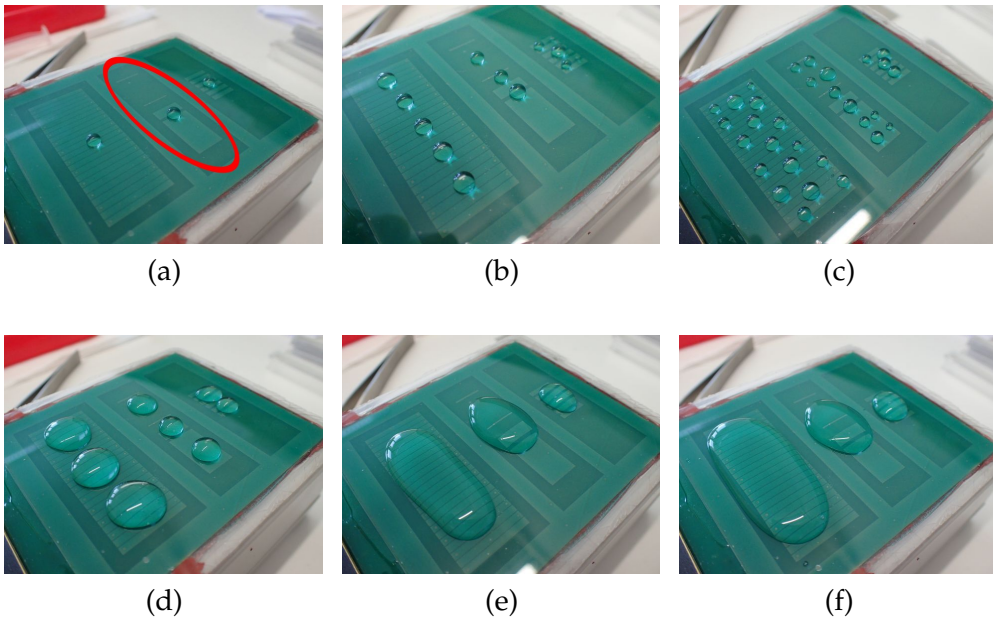
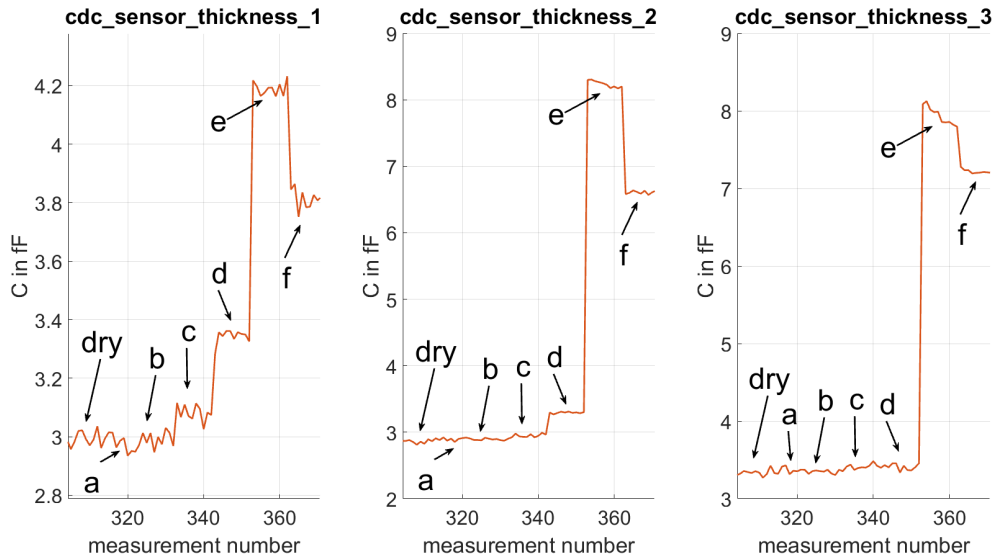


Abbildung 4.6: Messelektroden mit Wassertropfen. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

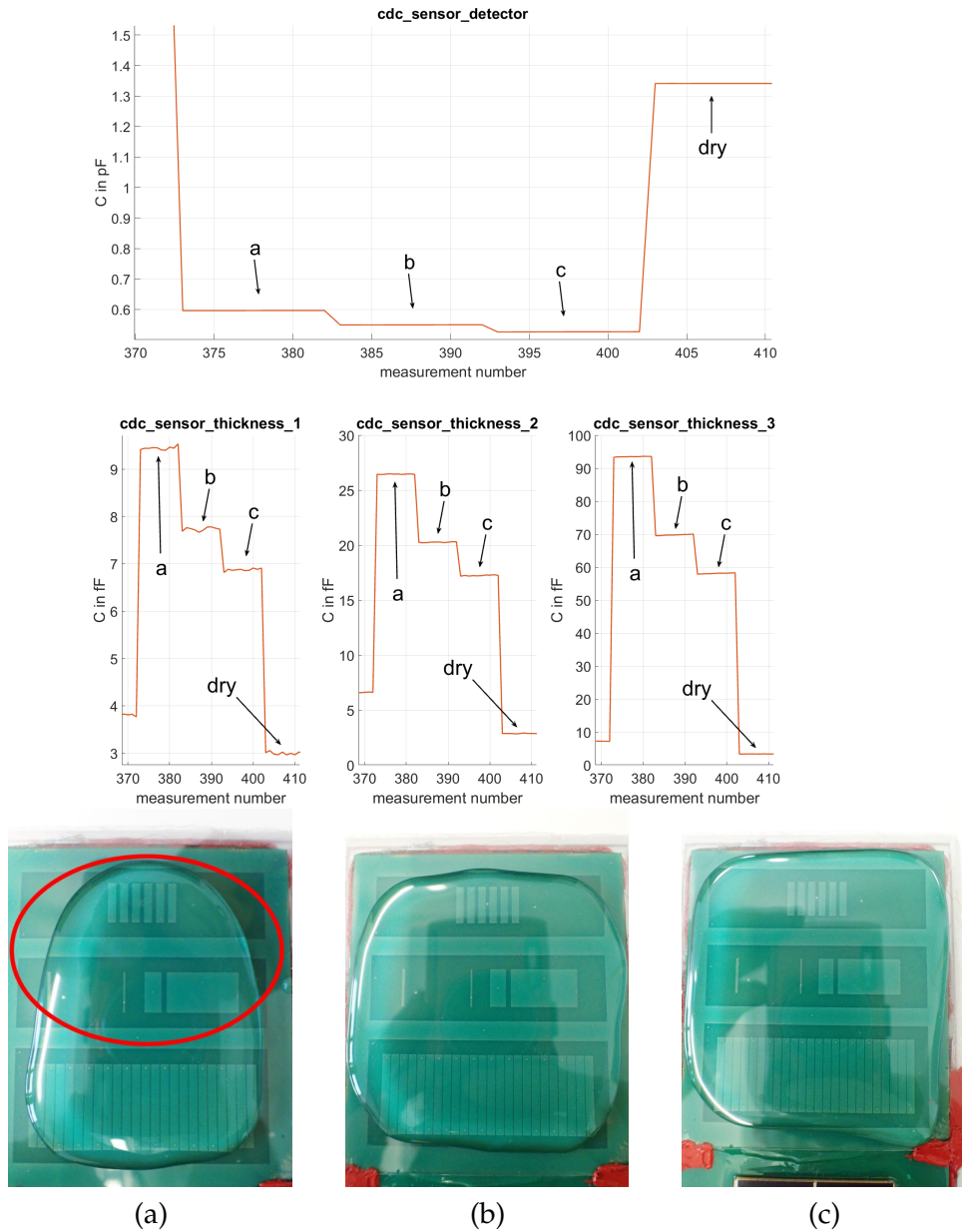


Abbildung 4.7: Messelektroden mit Wasserfilm. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (oben) und die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (mittig) jeweils bei Raumtemperatur (im Bild (a) sind die Elektroden rot markiert, dabei ist die Elektrode oben (Wasser-Eis) und unten (Eisdicke) zu sehen). Darstellung der Rohwerte.

4.2 Vereisung von Wassertropfen

In der folgenden Messung werden Wassertropfen, welche über den Elektroden platziert sind, vereist. Die Temperatur wird dabei schrittweise von 30°C auf -30°C verringert. In den folgenden Abbildungen wird – aus Übersichtgründen – nur auf einen Teilbereich des Ablaufes eingegangen.



Abbildung 4.8: Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer bedeckt mit Wassertropfen.

In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung nach dem CDC-Verfahren dargestellt. Unter (a) ist der noch nicht gefrorene Zustand abgebildet, wobei der Kapazitätswert – infolge der Verringerung der Permittivität – erwartungsgemäß über den gefrorenen Zuständen (b) und (c) liegt. Es fällt auf, dass es bei kälteren Temperaturen zu einer weiteren Verringerung der Kapazität kommt. Dies lässt sich mit der Temperaturabhängigkeit der Permittivität und mit der Verringerung der absoluten Luftfeuchtigkeit erklären (siehe Kapitel 2). Es sei angemerkt, dass der Wassertropfen stetig an Volumen verliert – dies ist auf den Bildern (d), (e) und (f) gut ersichtlich. Der Theorie zufolge müsste es vom Zustand (e) zum Zustand (f) (hier findet der Auftauvorgang statt) zu einer Vergrößerung der Kapazität kommen. Dies tritt wider Erwarten nicht ein. Eine Erklärung

4 Eis- und Wasser-Messungen

kann in der weiteren Verflüchtigung des Wassertropfens beim Auftauvorgang und der nur teilweise aufgetauten Wassertropfen liegen (siehe Bild (f)). Dadurch werden auch die Herausforderungen beim CDC-Verfahren sichtbar. Kapazitätswerte können nicht einfach einem Zustand zugeordnet werden, da die Wasser-/Eis-Mengen Einfluss auf die Kapazität haben. So könnte zum Beispiel eine große Eisschicht eine gleiche Kapazität wie ein kleiner Wassertropfen besitzen. Bei diesem Verfahren sollte demnach aus dem Verlauf der Messungen auf den Zustand auf der Elektrode rückgeschlossen werden und nicht aufgrund eines einzelnen Messwertes.

In Abbildung 4.10 sind die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung nach dem Impedanz-Messverfahren dargestellt. Hierbei sind – aus Gründen der Übersicht – nur drei Messfrequenzen beispielhaft dargestellt (6 kHz, 25 kHz, 100 kHz). Interessant sind insbesondere die Kapazitätswerte, welche Offset befreit sind und deshalb negative Werte aufweisen. Im nicht gefrorenen Zustand (a) weisen alle Kapazitäten die selben Werte auf. Im Zustand (b) beginnt die Vereisung und es lässt sich die Trennung der Kapazitäten bei unterschiedlichen Frequenzen – insbesondere bei 100 kHz – erkennen. Dies stimmt tendenziell gut mit der Theorie überein, der zufolge sich bei höheren Frequenzen die Permittivität und damit die Kapazität verkleinern sollten (siehe Abbildung 2.1). Im Laufe des Vereisungsvorganges (b)(c)(d) trennen sich die Kapazitätswerte immer weiter voneinander und verringern sich weiterhin. Dies lässt sich durch den voranschreitenden Vereisungsvorgang und erneut mit der Temperaturabhängigkeit der Permittivität und über eine Verringerung der absoluten Luftfeuchtigkeit erklären. Bei steigenden Temperaturen (e) verschiebt sich die Kapazität, die bei 25 kHz gemessen wird, wieder deutlich in Richtung der Kapazität, welche bei 6 kHz auftritt. Die Kapazität bei 100 kHz verschiebt sich erst deutlich später zu den anderen beiden Kapazitätswerten. Dies deutet auf eine allgemeine Verschiebung der, in Abbildung 2.2 dargestellten, Kurven zu höheren Frequenzen, wie es auch in [6] beschrieben ist, hin. Im Zustand (f) sind die Tropfen wieder aufgetaut und alle Kapazitäten haben annähernd erneut den gleichen Wert. Bei höheren Frequenzen ergibt sich im Zustand Eis ein größerer Leitwert als im Zustand Wasser (siehe Kapitel 2). Dies ist an den Leitwerten bei den Frequenzen 25 kHz und 100 kHz erkennbar, da diese bei Vereisung zunehmen. Bei 6 kHz ist eine leichte Abnahme des Leitwertes erkennbar, welche sich dadurch erklären lässt, dass sich der Leitwert für niedrigere Frequenzen im Zustand Eis verkleinert. Dass sich der

4 Eis- und Wasser-Messungen

Leitwert bei höheren Frequenzen und kalten Temperaturen verkleinert, kann wiederum mit der Verschiebung des Leitwertes über die Temperaturbereiche begründet werden.

Es kann gezeigt werden, dass sowohl mit dem CDC- als auch mit dem IQ-Verfahren Eis detektiert werden kann. Beim Übergang von Wasser zu Eis – und umgekehrt – treten die erwarteten Kapazitätsänderungen infolge der veränderten Permittivität auf. Im Gegensatz zum CDC-Verfahren kann beim IQ-Verfahren mithilfe der Kapazitäts- und Leitwert-Unterschiede zwischen den verschiedenen Messfrequenzen relativ einfach – auch bei nur einer Messung – auf Wasser oder Eis rückgeschlossen werden. Dabei kann beim IQ-Verfahren vereinfacht gesagt werden, dass bei Wasser alle Kapazitätswerte nahezu identische Werte haben, diese sich beim Zustand Eis jedoch – infolge des frequenzabhängigen Permittivitätsverlaufes – auftrennen. Beim CDC-Verfahren müssen längere Messverläufe analysiert werden, da gleiche Kapazitätswerte durch verschiedene Konstellationen zustande kommen können. Des Weiteren kann eine Verschiebung des frequenzabhängigen Permittivitätsverlaufes bei Eis hin zu höheren Frequenzen beobachtet werden.

4 Eis- und Wasser-Messungen

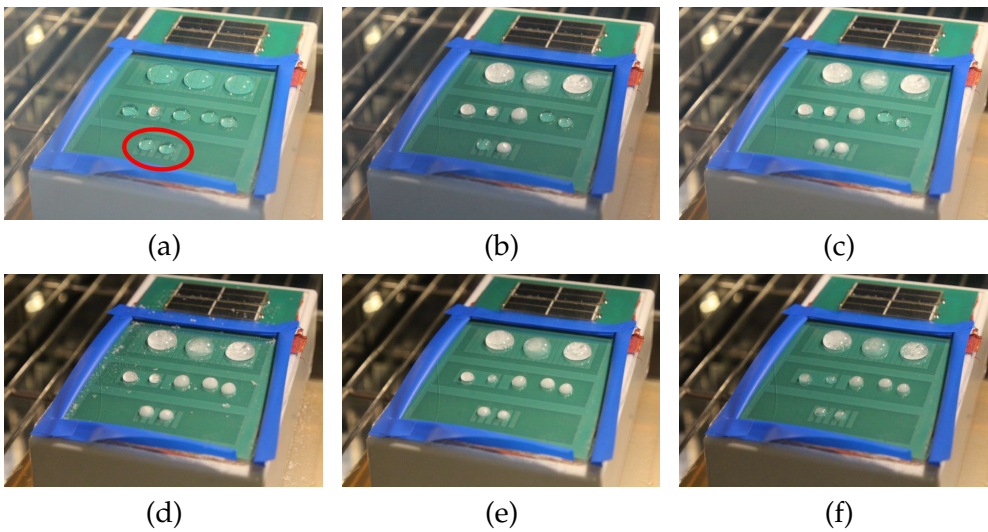
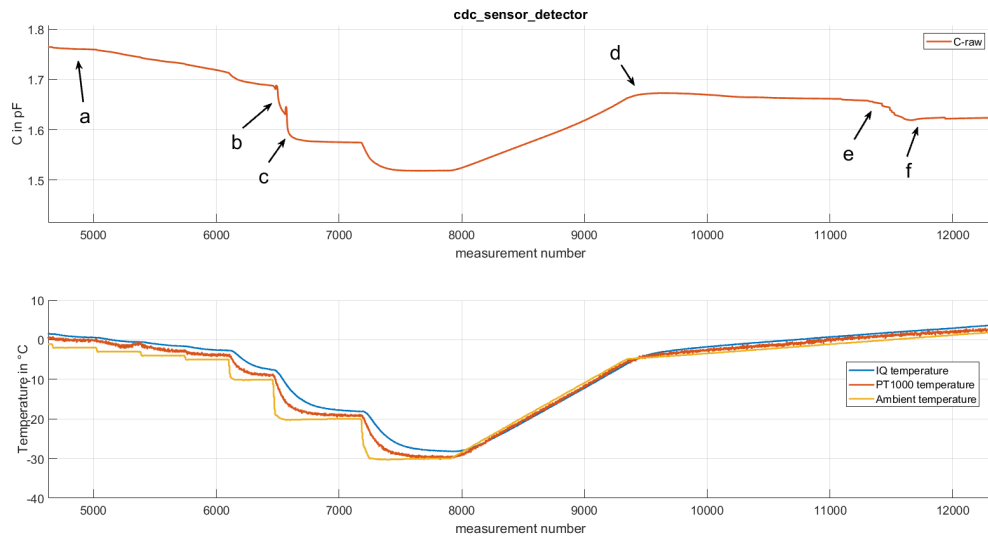


Abbildung 4.9: Messung mit Eisbildung. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d)(e) Eis, (f) beim Auftauen. Darstellung der Rohwerte.

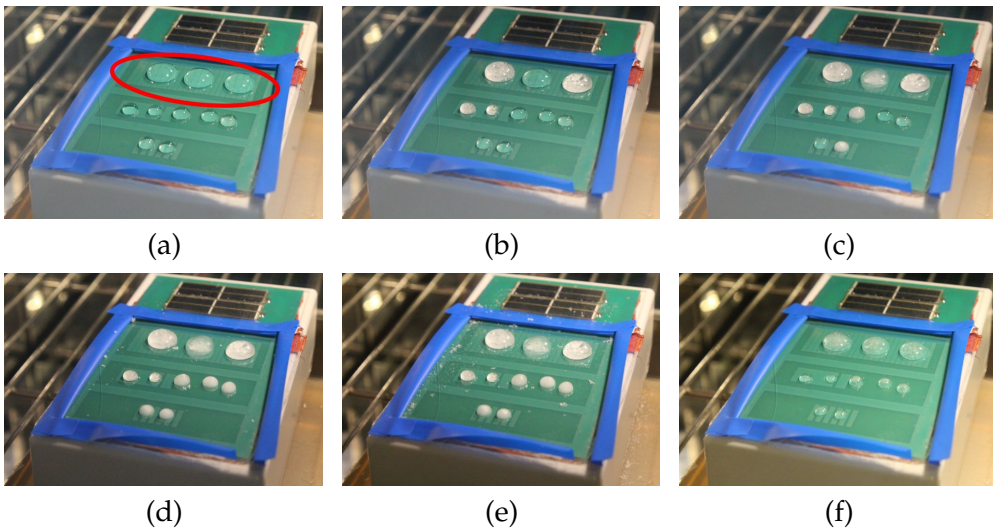
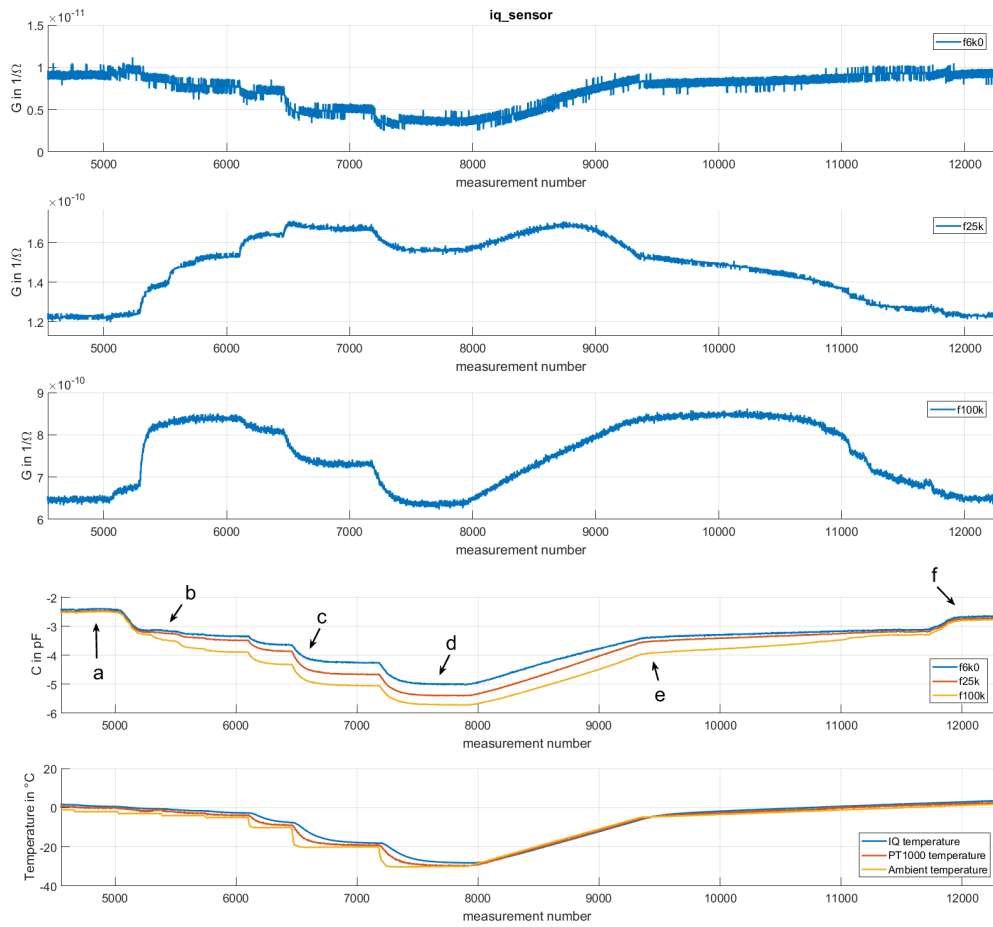


Abbildung 4.10: Messung mit Eisbildung. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d)(e) Eis, (f) beim Auftauen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 34 pF).

4.3 Vereisung eines Wasserfilms

In der folgenden Messung wird ein Wasserfilm gleichmäßig über der gesamten Elektrodenfläche aufgetragen und vereist. Die Temperatur wird dabei schrittweise von 30 °C auf –30 °C verringert. In den folgenden Abbildungen wird dabei – aus Übersichtgründen – nur auf einen Teilbereich des Ablaufes eingegangen.



Abbildung 4.11: Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, Elektrodenfläche bedeckt mit Eisfilm.

In Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung nach dem CDC-Verfahren dargestellt. Dabei fällt auf, dass – im Gegensatz zu Messung 4.2 – bei Eis die Kapazität ansteigt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Elektrode – welche vollständig mit Wasser bedeckt ist (a) – einen guten Koppelpfad (höhere Verschiebestrome) zur Massefläche um die Elektrode besitzt und dadurch eine kleinere Kapazität zur Empfänger-Elektrode als im trockenen Zustand vorhanden ist (vergleiche (a) mit (dry), wobei (dry) den trockenen Zustand der Elektrode markiert). Wenn das Wasser einfriert (b)(c)(d), verringert sich die Permittivität und damit verkleinert sich der Koppelpfad zur Massefläche. In weiterer Folge steigt die Kapazität an, weil mehr Verschiebestrome wieder zur Empfänger-Elektrode gelangen (Koppelpfad erhöht sich). Die Änderung der Kapazität bei kälteren Temperaturen

4 Eis- und Wasser-Messungen

lässt sich erneut mit der Temperaturabhängigkeit der Permittivität erklären. Im Zustand (e) und (f) erfolgt das Auftauen, dabei wird der Koppelpfad zu den umliegenden Masseflächen wieder besser und die gemessenen Kapazitätswerte nehmen erneut ab. Am Ende der Messung wird das Wasser entfernt und die Elektrode im trockenen Zustand gemessen (dry).

In Abbildung 4.13 sind die Ergebnisse der Elektrode zur Eisdicken-Messung – zur Veranschaulichung der Unterschiede zur Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung – nach dem CDC-Verfahren dargestellt.

- Eisdicken-Elektrode 1 (am nächsten an der Sende-Elektrode):
Wie schon in Abbildung 4.7 ersichtlich ist, wird der Koppelpfad zu Massefläche um die Elektrode nicht so dominant, sodass die Kapazitätswerte unter jene der Elektrode im trockenen Zustand fallen (vergleiche (a) mit (dry)). Die Kapazität steigt, aufgrund des abgeschwächten Koppelpfades zur Massefläche, bei der Vereisung zunächst an (b)(c). Bei sehr kalten Temperaturen (d) sinkt die Kapazität unter ihren Anfangswert, dies ist wahrscheinlich durch ein weiteres Absinken der Permittivität infolge der Verschiebung der Permittivität über die Temperaturbereiche zu erklären.
- Eisdicken-Elektrode 2 (am zweit nächsten an der Sende-Elektrode):
Diese verhält sich ähnlich wie Eisdicken-Elektrode 1. Es fallen kleinere Ausschläge auf.
- Eisdicken-Elektrode 3 (am weitesten von der Sende-Elektrode entfernt):
Die Erhöhung der Kapazität am Anfang der Vereisung ist nur sehr abgeschwächt und kurz bemerkbar. Dies deutet darauf hin, dass die Elektrode aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften weniger durch die Koppelleffekte der Massefläche um die Elektrode herum beeinflusst wird. Die Verringerung der Kapazität bei kalten Temperaturen ist auch hier beobachtbar.

Abbildung 4.14 zeigt die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung nach dem Impedanz-Messverfahrens. Hierbei sind – aus Gründen der Übersicht – nur vier Frequenzen beispielhaft dargestellt (1,2 kHz, 6 kHz, 25 kHz, 100 kHz). Wie in Abbildung 4.12, fällt auch hier auf, dass die Kapazität mit der Vereisung zunimmt. Im nicht gefrorenen Zustand (a) sind die unterschiedlichen Kapazitätswerte annähernd gleich (die Werte sind Offset befreit). Sobald die Vereisung eintritt (b), erhöht sich die Kapazität besonders bei höheren Frequenzen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Elektrode

4 Eis- und Wasser-Messungen

– welche vollständig mit Wasser bedeckt ist (a) – einen guten Koppelpfad (höhere Verschiebestrome) zur Massefläche um die Elektrode besitzt und dadurch eine kleinere Kapazität zur Empfänger-Elektrode als im trockenen Zustand aufweist (vergleiche (a) mit (dry), wobei (dry) den trockenen Zustand der Elektrode markiert). Nun wird insbesondere bei höheren Frequenzen die Permittivität infolge der Vereisung und dadurch auch der Koppelpfad zur Massefläche verringert. Daraus resultiert ein größerer Verschiebestrom zur Empfänger-Elektrode und es kommt zu einer höheren Kapazität. Erneut ist die Trennung der Kapazitätswerte bei Vereisung gut ersichtlich (b)(c)(d)(e). Bei niedrigeren Temperaturen kommt es bei Messungen mit höheren Frequenzen zu einem kleineren Kapazitätswert. Dies tritt ab Frequenzen von ~ 12 kHz (nicht aus dem Kurvenverlauf ersichtlich) auf. Die Annahme liegt nahe, dass es durch die kältere Temperatur zu einer weiteren Permittivitäts-Verkleinerung kommt und somit die Kapazität in Richtung jener der Elektrode im trockenen Zustand wandert. Dies deutet erneut auf eine allgemeine Verschiebung der in Abbildung 2.2 dargestellten Kurven in Richtung höherer Frequenzen hin. Beim Abtauen (e) nähern sich die Kapazitätswerte wieder aneinander an, bis diese erneut im abgetauten Zustand (f) nahezu identisch sind. Am Ende der Messung wird der trockene Zustand der Elektrode gemessen (dry).

Es kann auch mit vollständig bedeckten Elektroden gezeigt werden, dass eine Wasser-Eis-Unterscheidung möglich sein sollte. Es treten dabei größere Verschiebestrome zu den umliegenden Masseflächen auf, die einen anderen Kapazitätsverlauf – als bei Vereisung von Wassertropfen (siehe Kapitel 4.2) – nach sie ziehen. Das Impedanz-Messverfahren zeichnet sich erneut durch eine einfache Wasser-Eis-Unterscheidung mithilfe der unterschiedlichen Kapazitätswerte bei verschiedenen Messfrequenzen im Zustand Eis aus.

4 Eis- und Wasser-Messungen

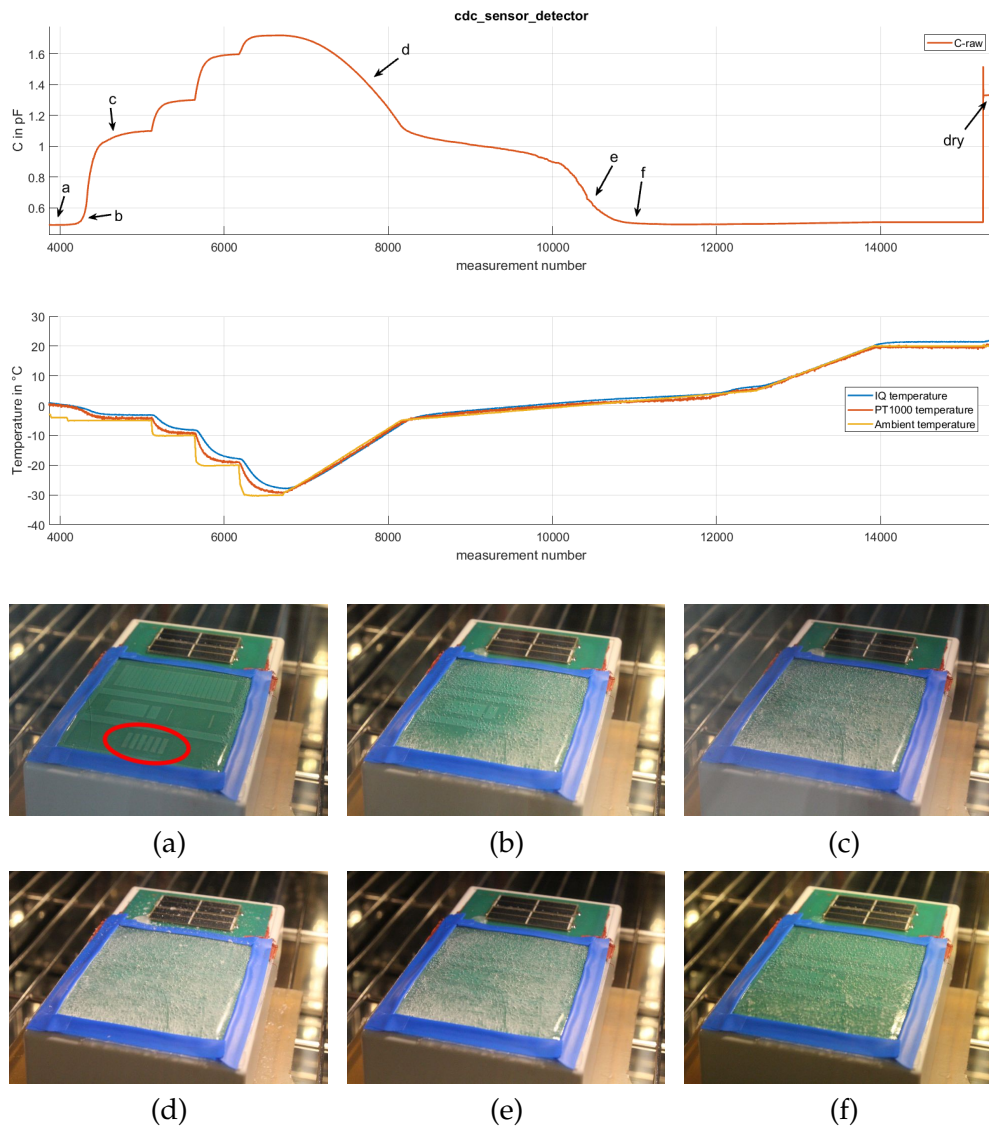


Abbildung 4.12: Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) fast aufgetaut. Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

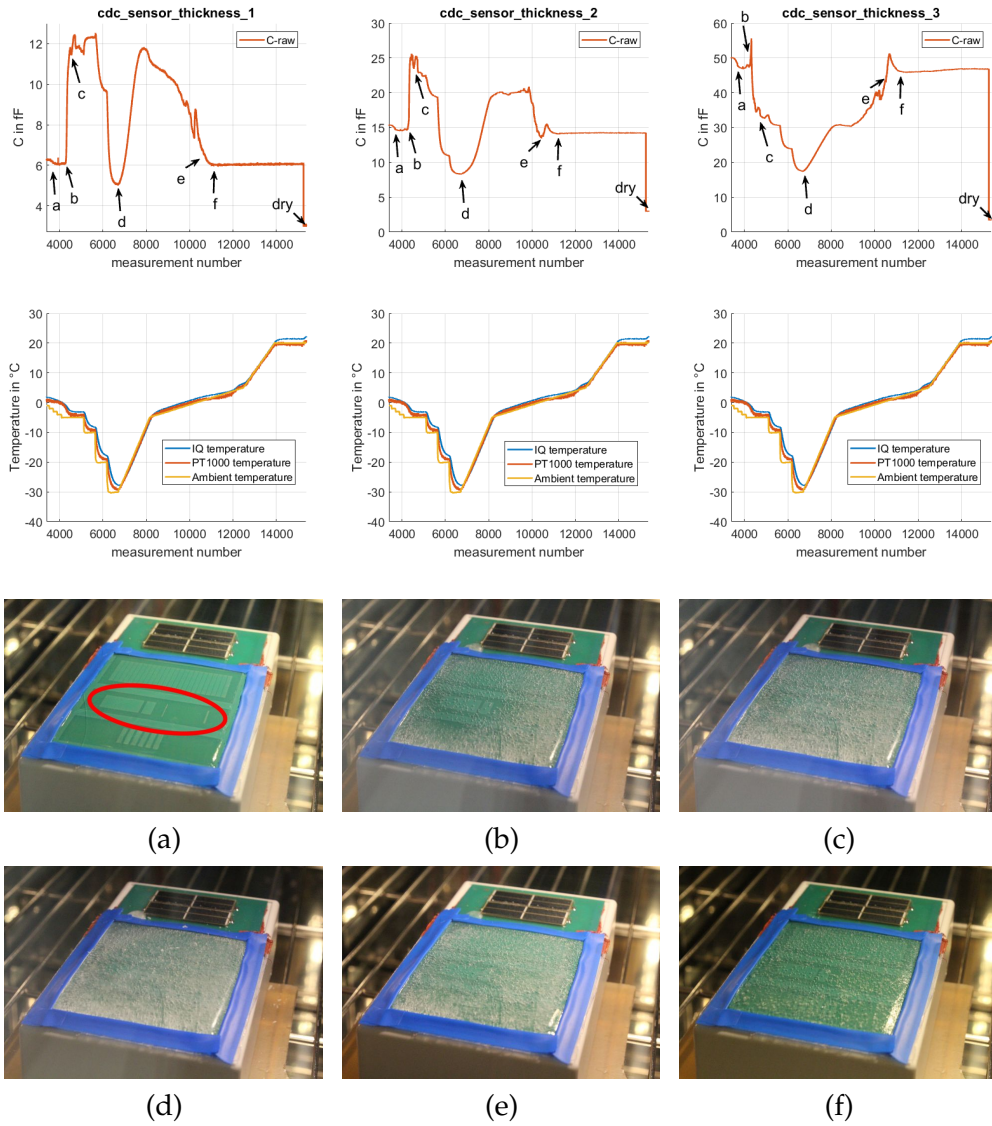


Abbildung 4.13: Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) fast aufgetaut. Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

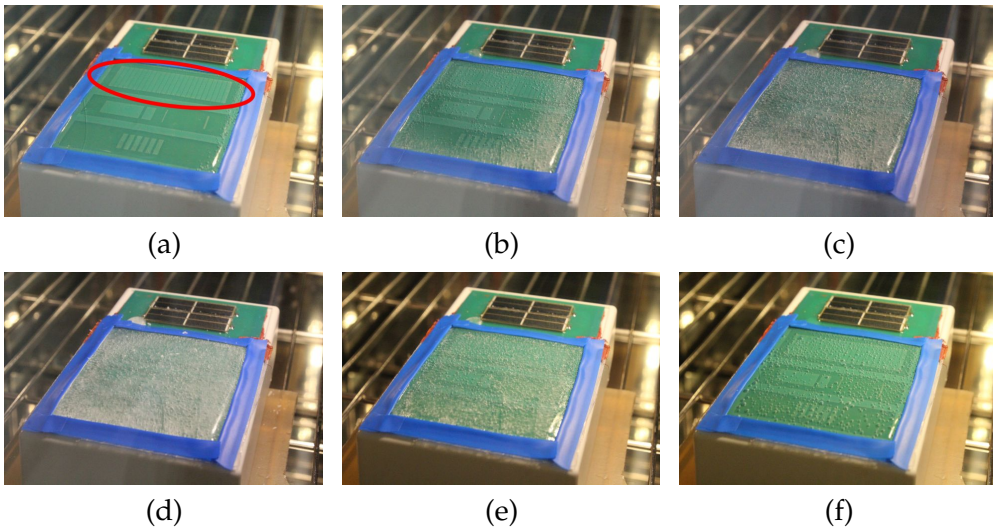
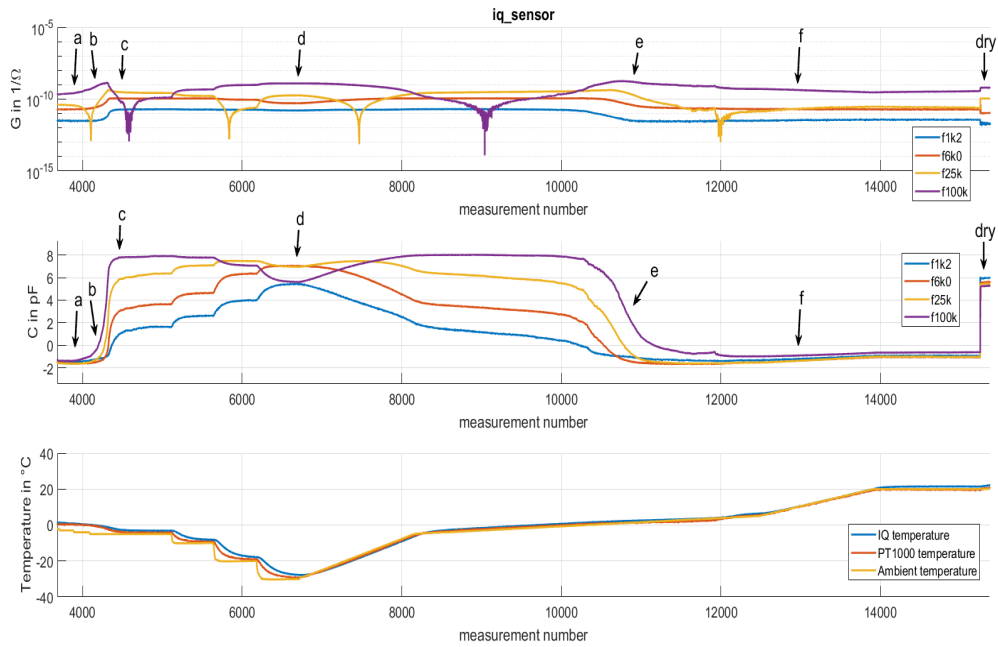


Abbildung 4.14: Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) aufgetaut. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 25 pF).

4.4 Vereisung unterschiedlicher Wassertropfen

In der folgenden Messung werden unterschiedliche Wassertropfen bzw. Wasserflächen über der Elektrodenfläche aufgetragen und vereist. Die Temperatur wird dabei konstant auf -20 °C geregelt. In den folgenden Abbildungen wird dabei – aus Übersichtgründen – nur auf Teilbereiche des Ablaufes eingegangen.



Abbildung 4.15: Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, Elektrodenfläche bedeckt mit Eisfläche.

In Abbildung 4.16 sind die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung – gemessen mithilfe des CDC-Verfahrens – dargestellt. Zwischen den trockenen Zuständen (markiert mit (dry)) werden Wassertropfen in unterschiedlicher Größe aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Vereisung – abhängig von der Wassertropfengröße – relativ schnell stattfindet. Dies ist am raschen Abfall der Kapazität zu erkennen, welcher durch die Verringerung der Permittivität – welche infolge der Vereisung stattfindet – hervorgerufen wird. Da diese Ergebnisse nur Wassertropfen direkt oberhalb der Elektrodenfläche beinhalten, kommt es zu keinem dominanten Pfad über die Massefläche. Es ist gut ersichtlich, dass selbst kleine Wassertropfen in diesem Szenario erkannt werden können und die Vereisung Auswirkungen auf die Gesamtkapazität hat.

4 Eis- und Wasser-Messungen

Die Testergebnisse in Abbildung 4.17 zeigen die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung, gemessen mithilfe des CDC-Verfahrens. Nach dem anfänglichen trockenen Zustand (markiert mit (dry)) werden größere Wasserflächen in unterschiedlicher Größe aufgetragen. Es ist im Zustand (a) gut zu erkennen, dass es aufgrund der nicht vorhandenen Überlappung zwischen Elektrodenfläche und der umliegenden Massefläche zu einer hohen Kapazität kommt. Sobald diese Überlappung stattfindet (Zustand (b) und kurz davor), sinkt die Kapazität unter jene des trockenen Zustandes. Dies ist eine Folge des dominant werdenden Koppelpfades zur umliegenden Massefläche. Nachdem das Wasser gefroren ist, – wodurch sich die Permittivität verkleinert – werden die Verschiebestrome über diesen Koppelpfad kleiner und die Kapazität beginnt zu steigen (b). Bei den folgenden Zuständen mit größeren Eisflächen wiederholt sich dieses Verhalten.

Beim Impedanz-Messverfahren, welches in Abbildung 4.18 dargestellt ist, ist der gleiche grundsätzliche Kapazitätsverlauf – wie beim CDC-Verfahren – erkennbar (siehe Abbildung 4.16). Die Erklärungen für diesen prinzipiellen Verlauf bleiben dieselben. Der Mehrwert dieses Verfahrens ist jedoch die Vielzahl verschiedener Kapazitäten bei den unterschiedlichen Messfrequenzen. Hier zeigt sich abermals, dass diese sich im vereisten Zustand trennen – so haben beispielsweise im noch nicht gefrorenen Zustand (a) alle Messungen annähernd die gleichen Werte, wohingegen sie sich in den vereisten Zuständen (b)(c)(d)(e)(f) voneinander trennen. Wie erwartet haben die Messungen bei höheren Frequenzen die kleinsten Kapazitäten. Hierbei fällt auf, dass größere bzw. mehrere Eistropfen einen größeren Kapazitätsunterschied bewirken. Die Kapazität nimmt nach dem Wasser-Auftragen infolge der Permittivitäts-Verkleinerung – durch die Vereisung – und des schwindenden Feuchtigkeitfilms – der durch das Tür-Öffnen entsteht – ab. Im Zustand (c) ist dargestellt, dass die Unterschiede für sehr kleine Eistropfen sehr gering ausfallen können. Fraglich ist hier, ob eine Wasser-Eis-Unterscheidung noch möglich wäre. Da genau dieser punktförmige Zustand (c) in der Realität vermutlich selten vorkommt, stellt sich die Frage, inwieweit das dieses System einschränken würde. Im Zweifelsfall könnten zum Beispiel die Werte des CDC-Verfahrens hinzugezogen werden. Bei den Leitwerten ist ersichtlich, dass sie bei Eisbildung für mittlere und höhere Frequenzen ansteigen (was der Theorie entspricht). Bei niedrigeren Frequenzen ist eine Verkleinerung des Leitwertes erkennbar (dies entspricht ebenfalls der Theorie, wenngleich

4 Eis- und Wasser-Messungen

es tendenziell auch für eine leichte Verschiebung des Kurvenverlaufes sprechen würde). Ansonsten lässt sich bei allen Wassertropfen gut zwischen Eis und Wasser unterscheiden. Allerdings muss hier beachtet werden, dass diese Messungen bei -20°C stattfinden und es bei Temperaturen um 0°C zu einer Verschiebung des Permittivitäts- und Leitwert-Verlaufes über die Frequenzen kommt.

Auch in Abbildung 4.19, welche die Ergebnisse des Impedanz-Messverfahrens darstellt, ist ein ähnlicher Kapazitätsverlauf wie beim CDC-Verfahren zu erkennen (siehe Abbildung 4.17). Die Erklärungen für diesen prinzipiellen Verlauf bleiben dieselben. In den Zuständen mit Eis auf den Elektroden (welche kurz nach dem Zustand (dry) immer eintreten) ist erneut erkennbar, dass die Kapazitätswerte bei verschiedenen Messfrequenzen unterschiedlich sind. Wie erwartet, haben die Messungen bei höheren Frequenzen die kleinsten Kapazitäten. Eine Ausnahme stellen hier nur die Zustände mit neu aufgetragenem Wasser dar (ab Bild (a)). Hierbei haben niedrigere Messfrequenzen kurzzeitig – bis das Wasser gefroren ist – eine kleinere Kapazität, welche unter den Wert der Kapazität im trockenen Zustand (dry) fallen kann. Dies ergibt sich infolge der insgesamt höheren Permittivität bei niedrigeren Frequenzen. Dadurch kommt es zu einem größeren Koppelpfad in Richtung der umliegenden Massefläche und damit zu größeren Verschiebeströmen. Mit dem Gefrieren des Wassers verringert sich die Permittivität und dadurch kommt es zu einer Verkleinerung des Koppelpfades und die Kapazität steigt an. Durch diesen schwindenden Einfluss des Koppelpfades zur Massefläche steigt die Kapazität über jene bei höheren Messfrequenzen an. Kurz zusammengefasst kann gesagt werden, dass infolge der höheren Permittivität bei niedrigen Frequenzen die Auswirkungen des Wasser-Eis-Gemisches auf die Koppelkapazität zur umliegenden Massefläche mehr Einfluss haben, dieser Koppelpfad durch das Gefrieren an Einfluss verliert und dadurch die niedrigeren Frequenzen einen höheren Kapazitätswert erreichen. Dieses Phänomen lässt sich über den gesamten Verlauf beobachten. Dies ist auch gut an den unterschiedlichen Kapazitätssprüngen bei neu aufgetragenem Wasser erkennbar, da diese bei kleineren Frequenzen wesentlich größer als bei höheren sind. Insgesamt kann mit diesem Test gezeigt werden, dass auch bei größeren Wasser-Eis-Flächen immer gut zwischen Wasser und Eis unterschieden werden kann. Zudem sollte die Kapazität immer mit mindestens drei verteilten Frequenzen gemessen werden, da es sonst passieren kann, dass eine Messung zum Beispiel

4 Eis- und Wasser-Messungen

zufällig zu einem Zeitpunkt stattfindet, an dem sich zwei Kapazitätswerte – infolge des schwindenden Einflusses des Koppelpfades zur umliegenden Massefläche – überschneiden. Dadurch kann fälschlicherweise der Eindruck entstehen, dass kein Eis vorhanden wäre. Die Messung einer dritten Kapazität bei einer unterschiedlichen Frequenz würde diesen Fehler ausschließen, da die Überschneidungen untereinander zu unterschiedlichen Zeitpunkten passieren. Damit kann in diesem Testszenario ungeachtet der verschiedenen Effekte und Verschiebungen immer zuverlässig zwischen Wasser und Eis unterschieden werden.

Mit diesem Test kann gezeigt werden, dass auch bei verschiedenen Wasser-Eis-Tropfen und Wasser-Eis-Flächen in unterschiedlichen Größen zwischen Wasser und Eis unterschieden werden kann. Durch unterschiedliche Größen und Anordnungen treten verschiedene Effekte auf, welche insbesondere bei der Messung nach dem CDC-Verfahren verstärkt analysiert werden müssen (da dieselben Kapazitätswerte durch unterschiedliche Konstellationen auftreten können). Des Weiteren kann gezeigt werden, dass beim IQ-Verfahren mit mindestens drei verteilten Frequenzen gemessen werden sollte. Dadurch kann ausgeschlossen werden, dass durch die Vereisung auf bestehenden Eisschichten eine kurzzeitige Überlappung der Kapazitäten bei nur zwei Messfrequenzen auf den Zustand Wasser rückschließen lassen würde.

4 Eis- und Wasser-Messungen

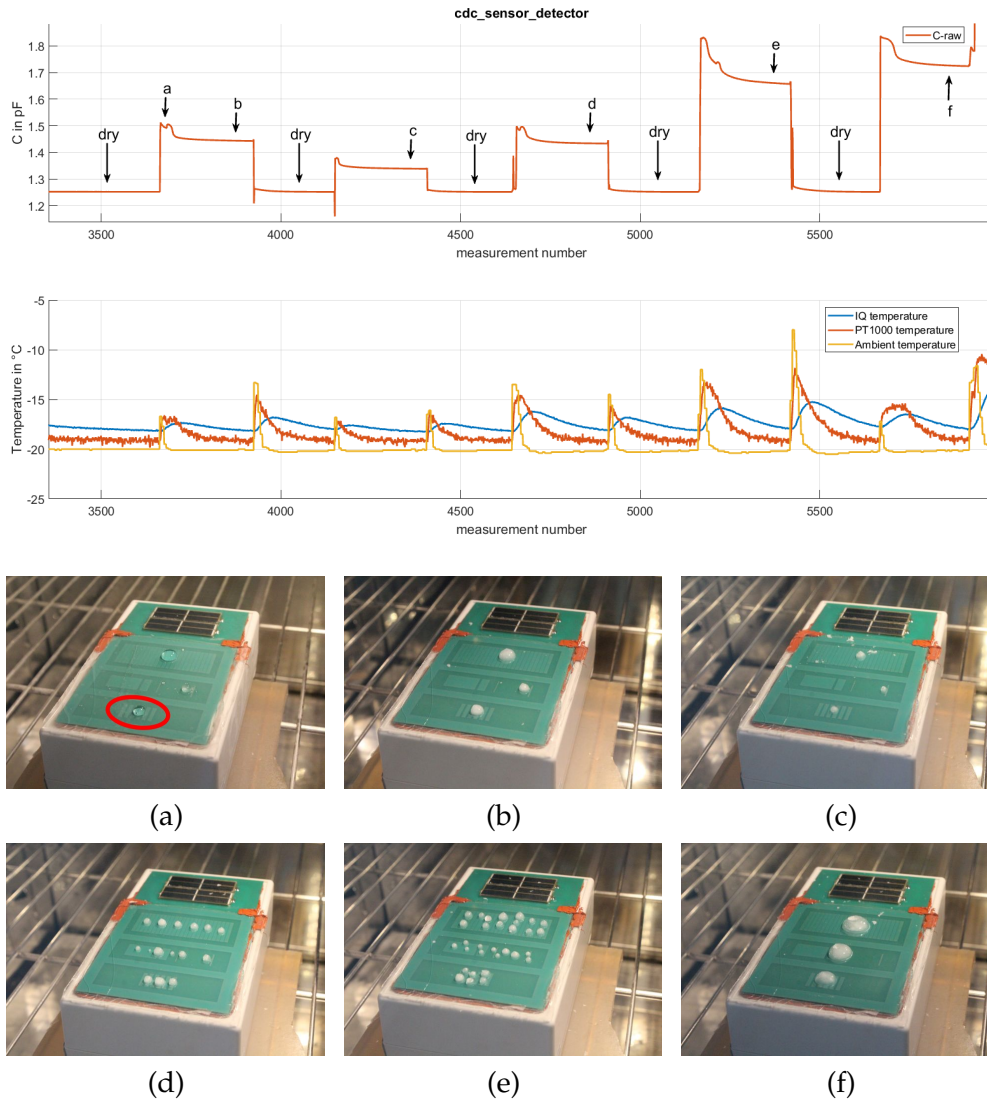


Abbildung 4.16: Messung mit unterschiedlichen Wassertropfen. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelner Wassertropfen, (b) einzelner Eistropfen, (c) einzelner kleiner Eistropfen, (d) mehrere Eistropfen in einer Linie, (e) mehrere Eistropfen in mehreren Linien, (f) einzelner großer Eistropfen. Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

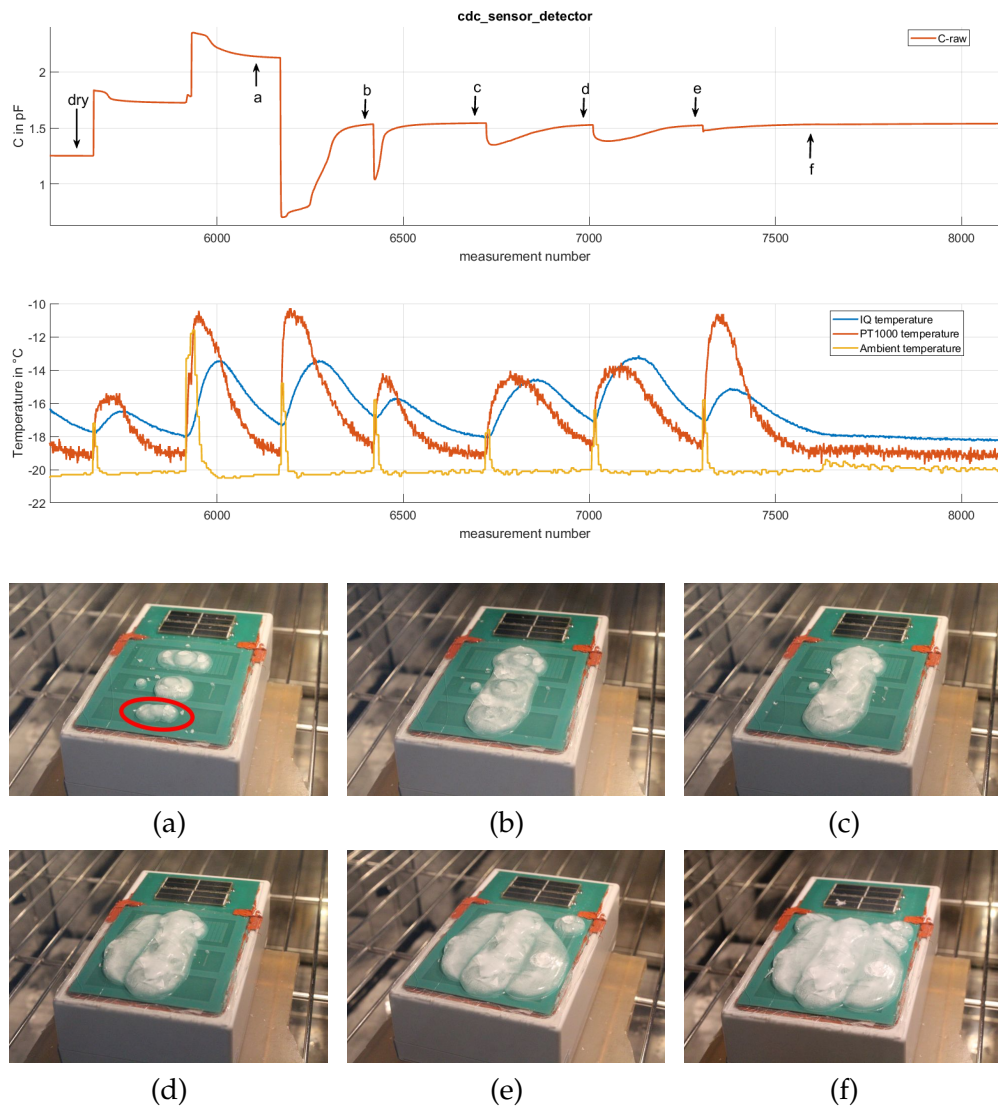


Abbildung 4.17: Messung mit unterschiedlich großen Wasser-Eis-Flächen. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

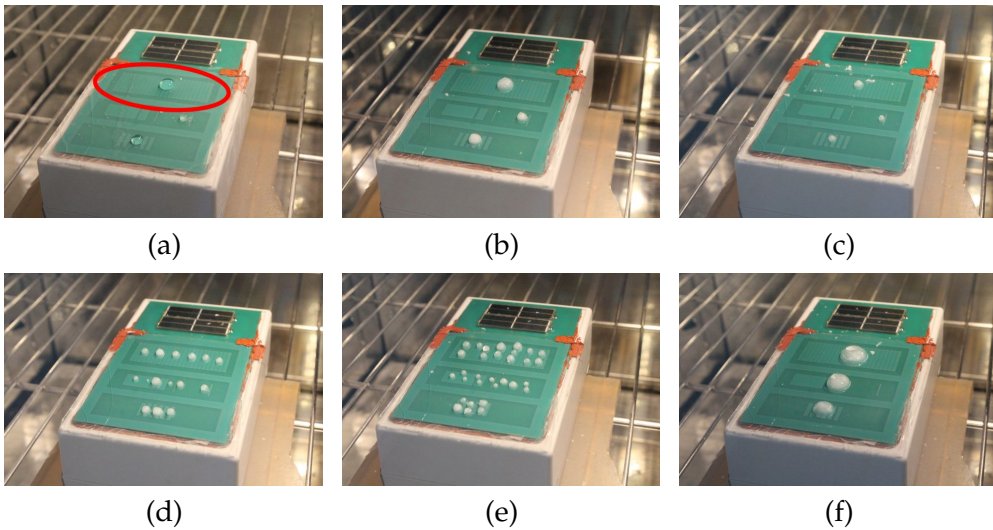
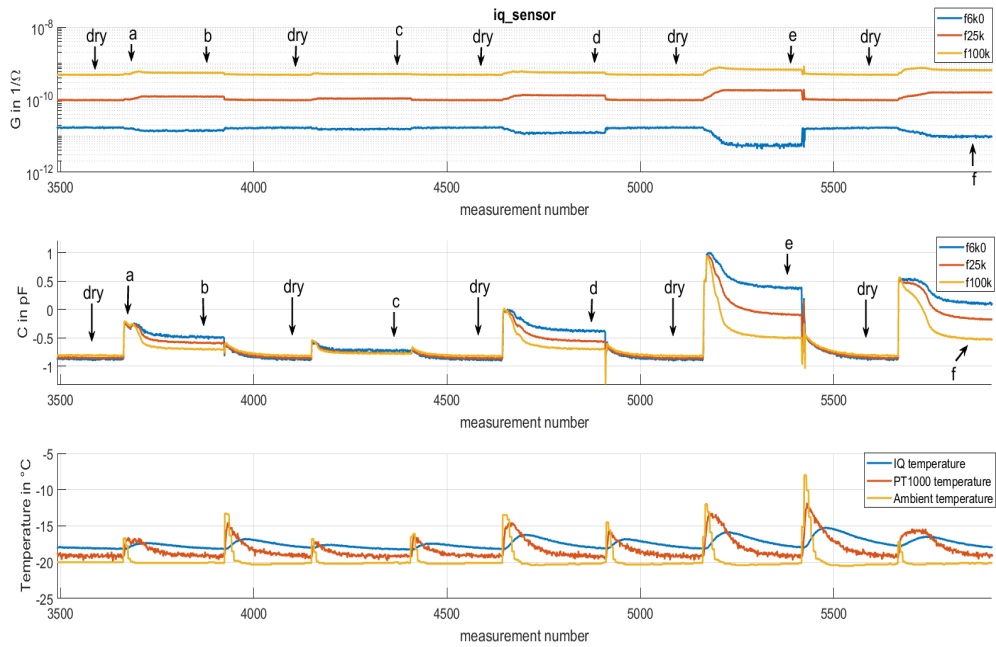


Abbildung 4.18: Messung mit unterschiedlichen Wassertropfen. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelner Wassertropfen, (b) einzelner Eistropfen, (c) einzelner kleiner Eistropfen, (d) mehrere Eistropfen in einer Linie, (e) mehrere Eistropfen in mehreren Linien, (f) einzelner großer Eistropfen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 29 pF).

4 Eis- und Wasser-Messungen

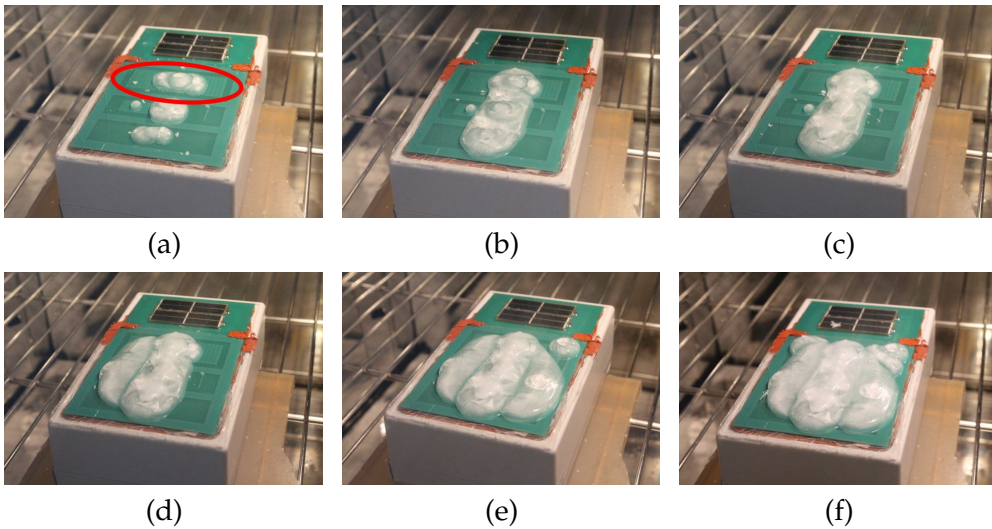
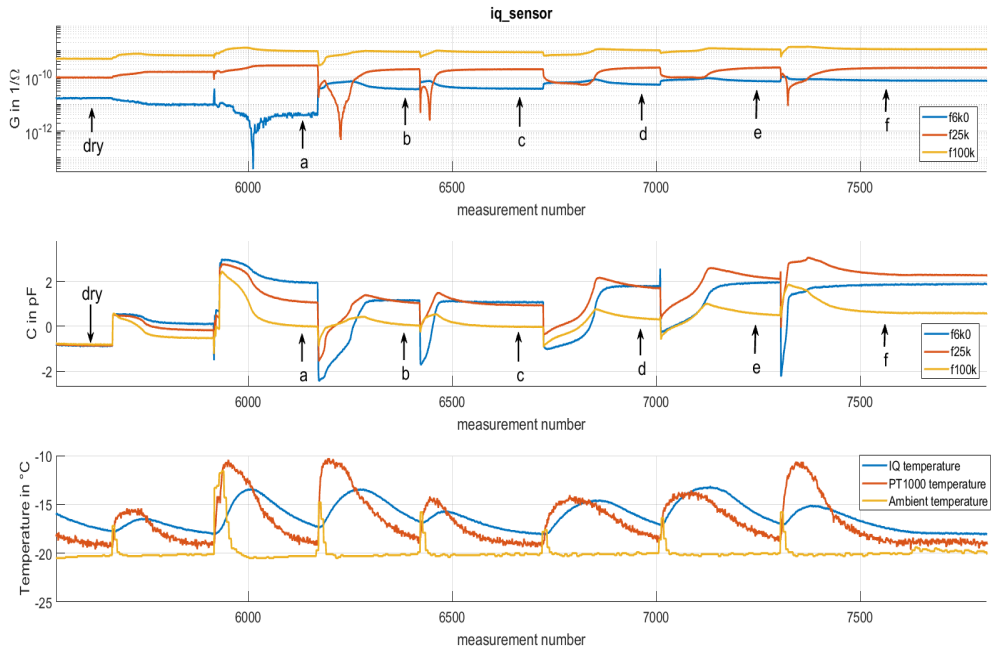


Abbildung 4.19: Messung mit unterschiedlich großen Wasser-Eis-Flächen. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 29 pF).

4.5 Dicker werdende Eisschicht

In der folgenden Messung wird mit einer Lackierpistole etappenweise Wasser auf die Elektrodenfläche aufgetragen. Die Temperatur wird während der Vereisung konstant auf $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und während des Auftauvorganges auf $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ geregelt. In den folgenden Abbildungen wird – aus Übersichtgründen – nur auf Teilbereiche des Ablaufes eingegangen.

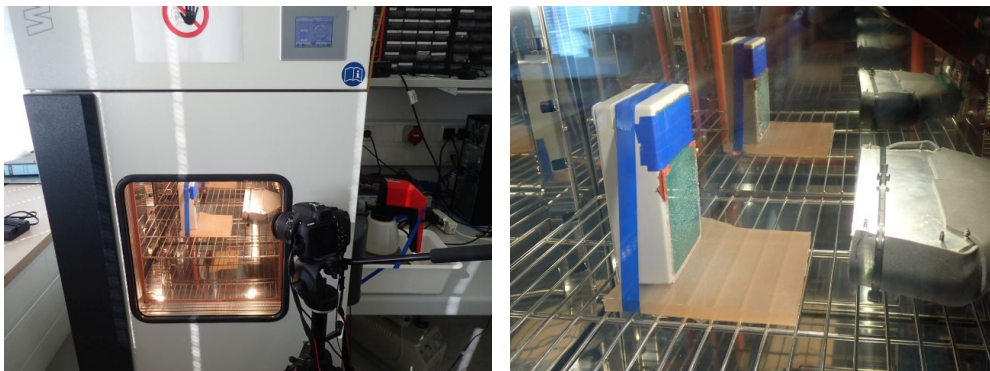


Abbildung 4.20: (links) Setup des Versuchsaufbaus mit Lackierpistole. (rechts) Gerät stehend mit Sprühdüse in Klimakammer.

In Abbildung 4.21 sind die Ergebnisse der Elektrode zur Wasser-Eis-Unterscheidung – gemessen mithilfe des CDC-Verfahrens – dargestellt. Am Beginn ist die Elektrode im trockenen Zustand (dry), danach werden etappenweise mithilfe kurzer Sprühstöße kleine Wassertropfen aufgetragen (a)(b). Die Sprühintervalle können aus den Messwerten – anhand der vorhandenen kurzen Spitzen – gut erkannt werden. Erwartungsgemäß nimmt der Kapazitätswert im Laufe der Vereisung, aufgrund der Zunahme der Permittivität, zu. Da der Randbereich der Elektroden von der Vereisung nicht ausgeschlossen bleibt, kommt es zu einem Verschiebestrom zu den umliegenden Masseflächen, dieser wird im Laufe der Messung jedoch nicht dominant (da die Permittivität von Eis nicht ausreicht) und hat im Verlauf der Messung unterschiedlich großen Einfluss. Die einzelnen Spitzen beim Besprühvorgang lassen sich folgendermaßen erklären: Das aufgetragene Wasser hat zu Beginn eine hohe Permittivität, wodurch sich eine hohe Kapazität ergibt. Es friert kurz darauf ein und verliert dadurch an Permittivität. Im Zustand (c) ist die maximale

4 Eis- und Wasser-Messungen

Eisdicke aufgetragen. In weiterer Folge setzt eine Temperaturerhöhung ein, welche nach einiger Zeit zum Schmelzvorgang führt. Durch das Schmelzen erhöht sich die Permittivität. Die Verschiebestrome in Richtung umliegender Massefläche nehmen zu und es kommt zu einem lokalen Minimum der Kapazität (d). In den Bildern ist gut zu erkennen, dass im Zustand (d) die CDC-Elektrode oben und unten gegen die Massefläche mit Wasser bzw. Eis bedeckt ist. Im Zustand (e) ist hingegen nur noch der untere Teil bedeckt – dies führt zu einem Rückgang der Verschiebestrome in Richtung Massefläche und damit zu einer höheren Kapazität. Nach dem trockenen Zustand (dry) werden Wassertropfen bei positiven Temperaturen aufgetragen, um zu zeigen, dass gleiche Kapazitätswerte trotz unterschiedlicher Aggregatzustände gemessen werden können. So hat der Zustand (b), bei dem sich eine dünne Eisschicht an der Elektrodenfläche gebildet hat, annähernd den gleichen Wert wie ein paar Wassertropfen (f). Hier zeigen sich die Einschränkungen dieses Verfahrens. Es kann bei den dargestellten Szenarien aus dem Verlauf mehrerer Messungen auf Eis bzw. Wasser rückgeschossen werden, nicht aber mit einer einzelnen Messung.

Im Vergleich dazu zeigt die Messung mithilfe des Impedanz-Messverfahrens einen Vorteil (siehe Abbildung 4.22). Die grundsätzlichen Kapazitätsverläufe und damit auch die Erklärungen bleiben annähernd gleich. Erneut sind die kleineren Kapazitätswerte bei höheren Messfrequenzen und eine ganz klare Trennung der Kapazitätswerte bei Eis auf der Elektrodenfläche erkennbar. Diese Trennung setzt bereits bei sehr dünnen bzw. sehr wenigen Eistropfen ein. Ab dem Messpunkt ~ 1250 nimmt die Kapazität bei einer Messfrequenz von 1,2 kHz ab – da anzunehmen ist, dass die hohen Verschiebestrome zur umliegenden Massefläche, infolge der größten Permittivität bei dieser Frequenz, an Einfluss gewinnen. Infolge der Temperaturerhöhung ab dem Messpunkt ~ 2100 kommt es zu einer Verschiebung der Permittivitätskurve und damit zu einer Erhöhung der Permittivität bzw. Kapazität bei höheren Messfrequenzen. Die Kapazitäten der höheren Messfrequenzen übersteigen dadurch nach einiger Zeit jene der niederen. Aufgrund der Verschiebestrome zur umliegenden Massefläche steigen Letztere nicht bzw. kaum weiter an.

Im Zustand (f), bei welchem das Wasser bei positiven Temperaturen aufgesprüht wird, zeigen sich die Vorteile dieses Verfahrens. Bei Wasser (f) bleiben alle Kapazitätswerte ansatzweise gleich. Im Gegensatz dazu erzeugt Eis (b) eine weite Zerstreung der Kapazitätswerte. Dadurch könnte im dargestellten

4 Eis- und Wasser-Messungen

Szenario aus einer einzelnen Messung – mit mehreren Messfrequenzen – auf Wasser oder Eis rückgeschossen werden.

Bei dieser Messung kann gezeigt werden, dass sowohl mit dem CDC-Verfahren als auch mit dem IQ-Verfahren auch bei dickeren Eisschichten zwischen Wasser und Eis unterschieden werden kann. Dabei kann gezeigt werden, dass die verwendeten Elektroden zur Wasser-Eis-Unterscheidung bei relativ dünnen Eisdicken ihre maximale Kapazität erreichen und damit nur bedingt für die Messung der Eisdicke geeignet sind. Des Weiteren zeigen sich erneut die Vorteile des IQ-Verfahrens gegenüber dem des CDC-Verfahrens auf Grund der leichteren Interpretation der Messwerte für die Wasser-Eis-Unterscheidung. Es wird veranschaulicht, dass beim CDC-Verfahren gleiche Kapazitätswerte durch verschiedene Konstellationen zustande kommen können.

4 Eis- und Wasser-Messungen

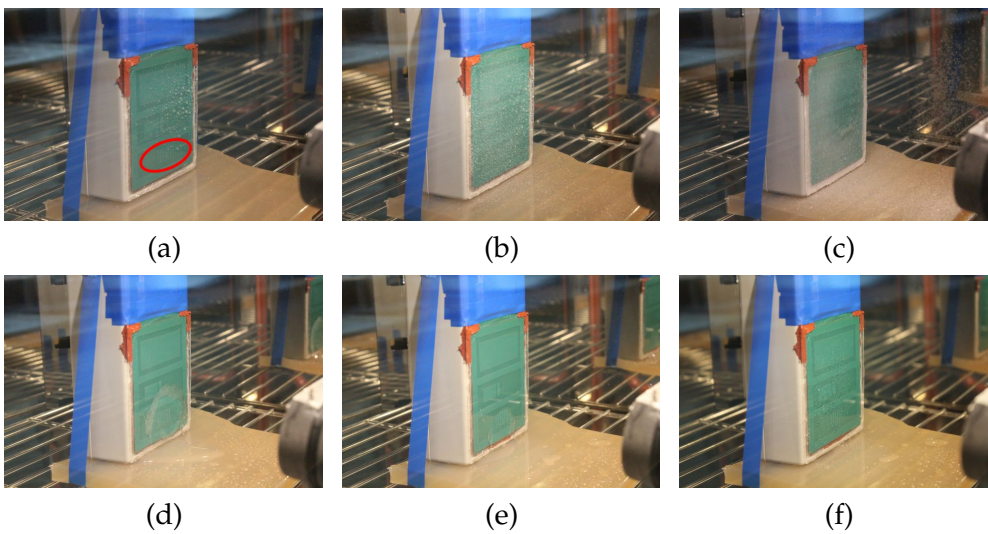
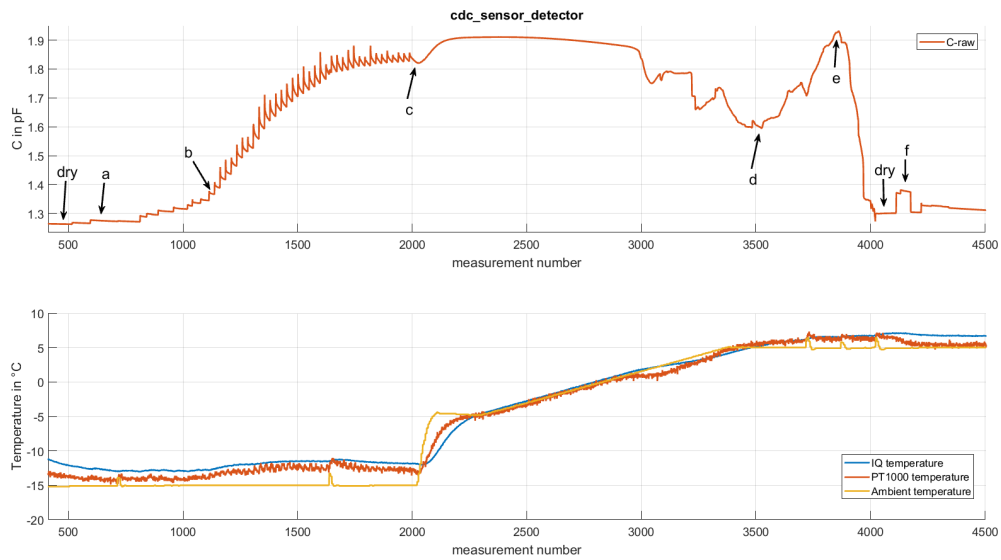


Abbildung 4.21: Messung mit unterschiedlichen Wasser- bzw. Eis-Tropfen und Schichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelne Eistropfen, (b) mehrere Eistropfen, (c) größte Eisschicht, (d) kleinere Eisschicht, (e) Eisschicht fast geschmolzen, (f) einzelne Wassertropfen. Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

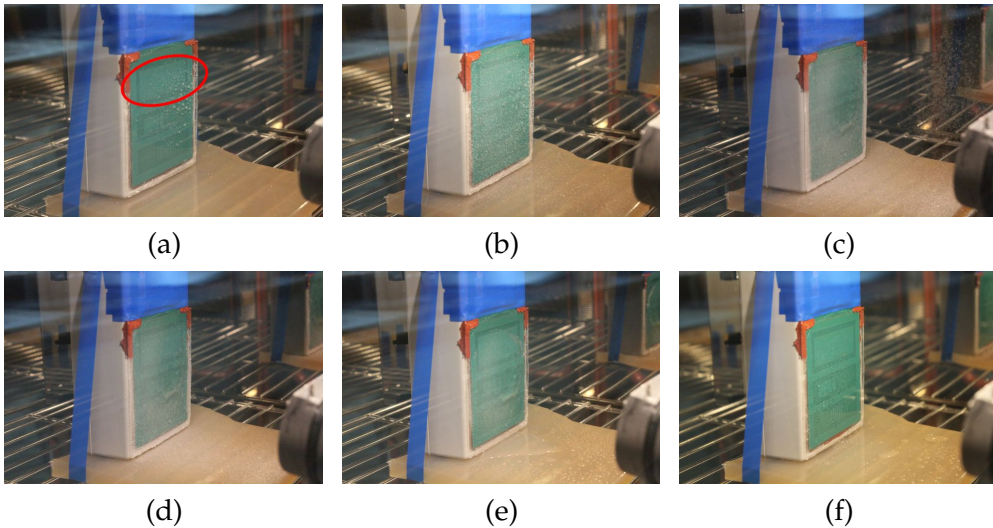
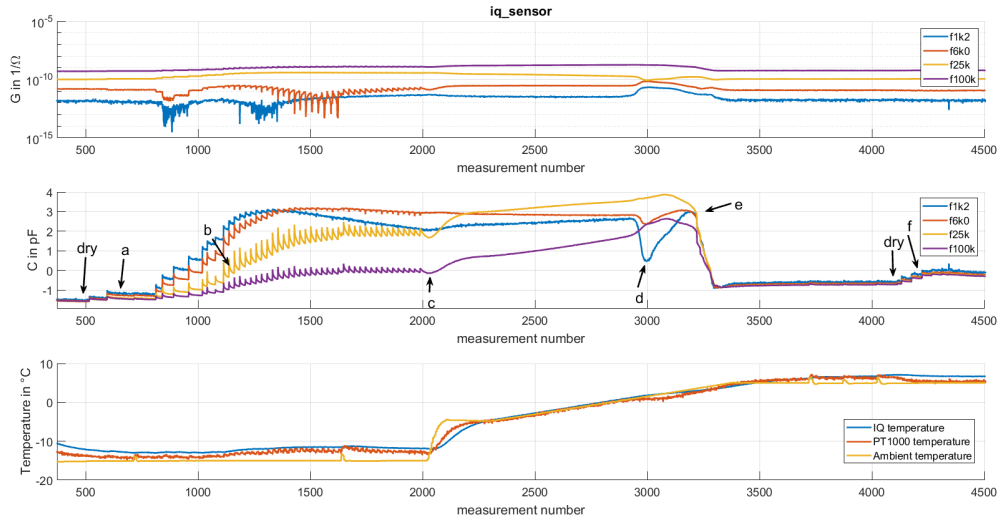


Abbildung 4.22: Messung mit unterschiedlichen Wasser- bzw. Eis-Tropfen und Schichten. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelne Eistropfen, (b) mehrere Eistropfen, (c) größte Eisschicht, (d) Eisschicht beim Schmelzen, (e) Eisschicht beim Schmelzen, (f) einzelne Wassertropfen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 31 pF).

4.6 Eisdicken-Messung 1

In der folgenden Messung wird mit einer Lackierpistole etappenweise Wasser auf die Elektrodenfläche aufgetragen. Die Temperatur wird dabei während der Vereisung konstant auf -20 °C geregelt. Ziel ist es, bei diesem Test eine möglichst dicke, einigermaßen gleichmäßige Eisschicht aufzutragen. Dies funktioniert unter anderem aufgrund des nicht gleichmäßig aufgetragenen Wassers nicht und führte in weiterer Folge zur Eisdicken-Messung 2. Die Ergebnisse werden hier dennoch kurz aufgezeigt. In den folgenden Abbildungen wird dabei - aus Übersichtgründen - nur auf Teilbereiche eingegangen.



Abbildung 4.23: (links) Gerät stehend mit Sprühdüse in Klimakammer. (rechts) Eisbildung auf Elektrodenfläche.

In Abbildung 4.24 sind die Ergebnisse der Elektroden zur Eisdicken-Messung – gemessen mithilfe des CDC-Verfahrens – dargestellt. Die Ergebnisse der anderen beiden Elektroden werden aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt. Diese gehen aufgrund ihres geometrischen Aufbaus schon bei relativ dünnen Eisschichten auf ihre maximale Kapazität zu, wobei sie anschließend bei dickeren Eisschichten gemäß Theorie wieder abnimmt.

Auch bei den dargestellten Elektroden zur Eisdicken-Messung tritt dieses Verhalten auf, allerdings erst bei dickeren Eisschichten. Die Idee, die hinter den drei unterschiedlichen Elektroden zur Eisdicken-Messung steckt, ist, dass sie gemeinsam die Eisdicke bis zu einer Maximalstärke von ungefähr 2 cm bestimmen können sollen. Dabei sollte die Eisdicken-Elektrode 1 (Sender und Empfänger am nächsten zueinander) die kleinste Dicke abdecken und am

4 Eis- und Wasser-Messungen

Kennzeichnung	Eisdicke in mm an den dicksten Stelle
(a)	*
(b)	*
(c)	~8
(d)	~11
(e)	~19
(f)	~25

Tabelle 4.2: Eisdicke bei verschiedenen Punkten

frühesten den Maximalwert erreichen. Die Eisdicken-Elektrode 2 (Sender und Empfänger in mittlere Distanz zueinander) sollte die mittleren Bereiche gut detektieren können und die Eisdicken-Elektrode 3 (Sender und Empfänger am weitesten voneinander entfernt) sollte auch noch die größten Eisschichten bestimmen können.

Die Kapazitätsverläufe zeigen diese erwarteten Tendenzen und nehmen im Laufe der dicker werdenden Eisschicht – infolge der höheren Permittivität – zu. Der Test muss im Laufe der Messungen unterbrochen werden (erkennbar an der Temperaturerhöhung), um die Sprühdüse teilweise zu enteisen und dickere Eisschichten auftragen zu können.

Auf den Fotos ist die punktförmige und dadurch nicht gleichmäßige Eisschicht zu erkennen, welche eine Beeinflussung der Ergebnisse nach sich zieht. So können die oben beschriebenen Eigenschaften der Elektroden nur ansatzweise nachgewiesen werden: Etwa dadurch, dass die Eisdicken-Elektrode 1 eher zu Beginn des Eisauftrags – also bei dünneren Eisschichten – einen relativ linearen Verlauf aufweist und die anderen Elektroden nacheinander erst später – bei dickeren Eisschichten – dieses Verhalten zeigen.

Es kann mit diesem Versuch trotz der Einschränkungen – durch die nicht gleichmäßig aufgetragene Eisschicht – gezeigt werden, dass die erwarteten Kapazitätsverläufe mit den Ergebnissen einigermaßen übereinstimmen und in gewissen Bereichen ein proportionaler Zusammenhang zwischen Eisdicke und Kapazitätswert besteht.

4 Eis- und Wasser-Messungen

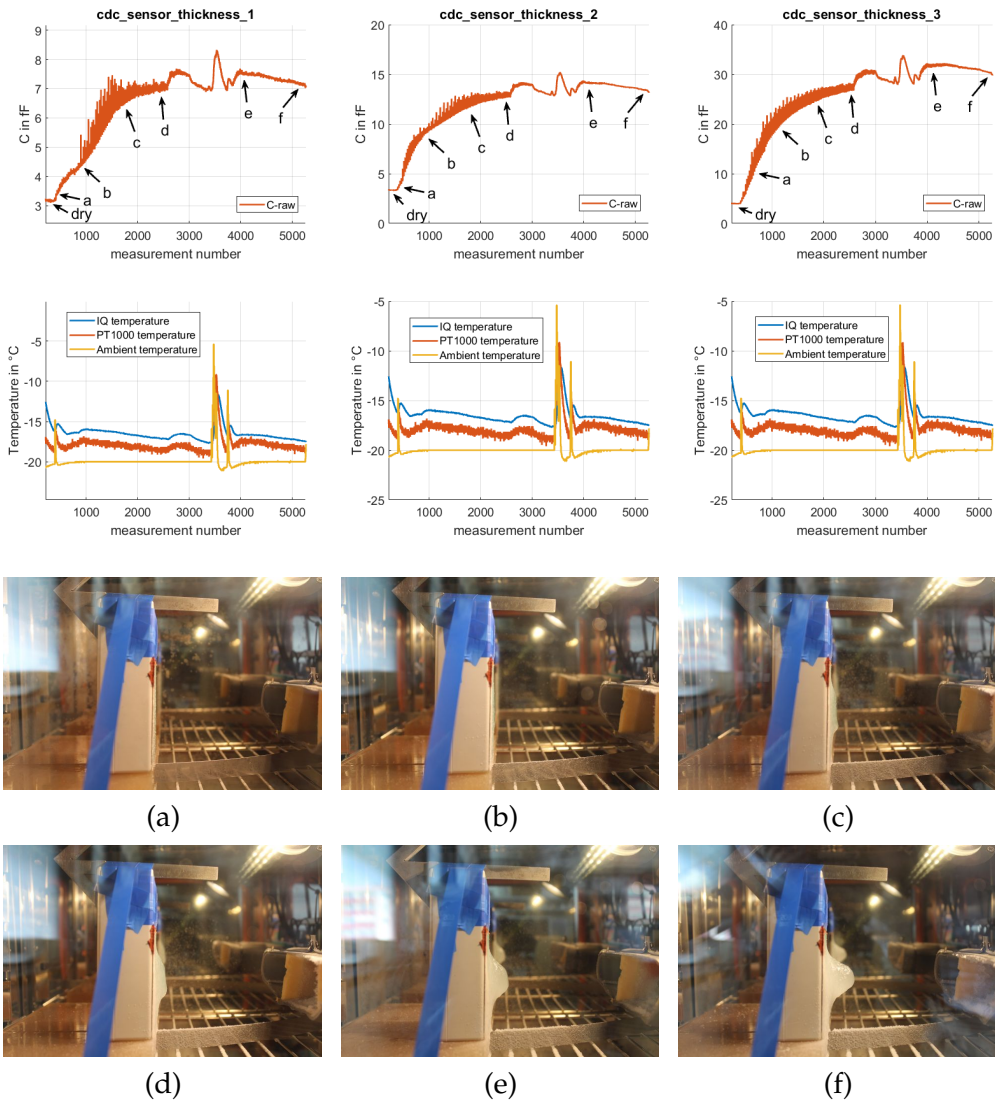


Abbildung 4.24: Messung mit unterschiedlichen Wasser-/Eis-Tropfen und Schichten. Messwerte der CDC-Elektrode für die Schätzung der Eisdicke sind dargestellt (Elektrode ist dabei ungefähr auf der Höhe der größten Eisschicht). (a) bis (f) dicker werdende Eisschicht. Die Rohwerte sind dargestellt.

4.7 Eisdicken-Messung 2

In der folgenden Messung wird mit einer Kunststoffumrandung etappenweise Wasser auf die Elektrodenfläche aufgetragen. Die Temperatur wird während der Vereisung konstant auf -20 °C geregelt. Die Kunststoffumrandung soll das Wasser über der Elektrodenfläche halten und somit gleichmäßig hohe Eisschichten ermöglichen. In den folgenden Abbildungen wird – aus Übersichtgründen – nur auf Teilbereiche eingegangen.

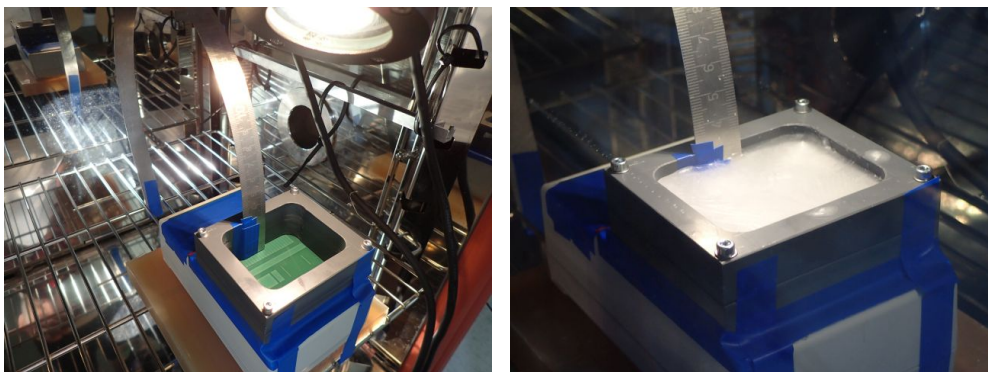


Abbildung 4.25: (links) Gerät mit Kunststoffumrandung auf der Elektrodenfläche und Lineal zur Messung der Eisdicke in der Klimakammer. (rechts) Dicke Eisschicht in der Kunststoffumrandung.

In Abbildung 4.26 werden die Ergebnisse der Elektroden zur Eisdicken-Messung – gemessen mithilfe des CDC-Verfahrens – dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Elektroden zur Wasser-Eis-Unterscheidung werden aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt. Sie nähern sich, aufgrund ihres geometrischen Aufbaus, schon bei relativ dünnen Eisschichten an ihre maximale Kapazität an. Diese nimmt danach bei dickeren Eisschichten, wie es der Theorie entspricht, wieder ab.

Auch bei den dargestellten Elektroden zur Eisdicken-Messung tritt dieses Phänomen auf, allerdings erst bei dickeren Eisschichten. Die Idee, die hinter den drei unterschiedlichen Elektroden zur Eisdicken-Messung steckt, ist, dass sie gemeinsam die Eisdicke bis zu einer Maximalstärke von ungefähr 2 cm bestimmen können sollen. Dabei sollte die Eisdicken-Elektrode 1 (Sender und Empfänger am nächsten zueinander) die kleinste Dicke abdecken und am

4 Eis- und Wasser-Messungen

frühesten den Maximalwert erreichen. Die Eisdicken-Elektrode 2 (Sender und Empfänger in mittlere Distanz zueinander) sollte die mittleren Bereiche gut detektieren können und die Eisdicken-Elektrode 3 (Sender und Empfänger am weitesten voneinander entfernt) sollte auch noch die größten Eisschichten bestimmen können.

Die Kapazitätsverläufe zeigen Spitzen sowohl hin zu größeren als auch zu kleineren Werten. Dies ist – wie auch am Temperaturverlauf ersichtlich – auf das Öffnen des Klimaschranks und das Nachfüllen von Wasser zurückzuführen. Das Wasser bewirkt, aufgrund der höheren Permittivität bis es gefroren ist, in Eisdicken-Elektrode 1 eine Spitze hin zu kleineren Kapazitätswerten (die Verschiebestrome in Richtung umliegender Massefläche werden größer) und bei Eisdicken-Elektrode 1 und 2 großteils eine Erhöhung der Kapazitätswerte. Beim Gefriervorgang kehren die Kapazitätswerte in Richtung Ausgangspunkt zurück. Die Werte nehmen infolge der kälter werdenden Eisschichten noch weiter ab. Zustand (a) zeigt den ersten Gefriervorgang. Bei dieser Messung werden vor allem die markierten Zustände (b-f) analysiert, da hier das Eis in unterschiedlichen Schichtdicken gleichmäßig gefroren ist. Es ist gut erkennbar, dass die Eisdicken-Elektrode 1 am frühesten ihren Maximalwert erreicht und danach weiter sinkt (b-f). Sie ist für die hier getesteten Eisschichten nicht optimal. Die Eisdicken-Elektrode 2 zeigt zwischen Zustand (b) und (c) zwar noch eine leichte Steigung – bei dickeren Eisschichten ist dies jedoch nicht mehr der Fall und die Werte beginnen leicht zu sinken. Eisdicken-Elektrode 3 zeigt erwartungsgemäß die besten Eigenschaften bei diesen Eisdicken. Die Kapazitätswerte steigen bis zum Zustand (e) leicht an und bleiben bis zum Zustand (f) auf ihrem Maximum.

Es kann gezeigt werden, dass bei gleichmäßig aufgetragenen Eisschichten auf die Eisdicke rückgeschlossen werden kann, dass ein proportionaler Zusammenhang zwischen Eisdicke und Kapazitätswert besteht und, dass die einzelnen Eisdicken-Elektroden in den dafür vorgesehenen Bereichen eingesetzt werden können. Gleichzeitig zeigen sich auch Einschränkungen. Es ist zum Beispiel gut erkennbar, dass die Messung der Eisdicke nur bei vollständig gefrorenen Schichten gut funktioniert, da beispielsweise Wasser auf Eis die Kapazitätswerte erheblich verändern kann.

4 Eis- und Wasser-Messungen

Kennzeichnung	Eisdicke in mm
(a)	~4
(b)	~7
(c)	~12
(d)	~18
(e)	~22
(f)	~30

Tabelle 4.3: Eisdicke in den markierten Zuständen

4 Eis- und Wasser-Messungen

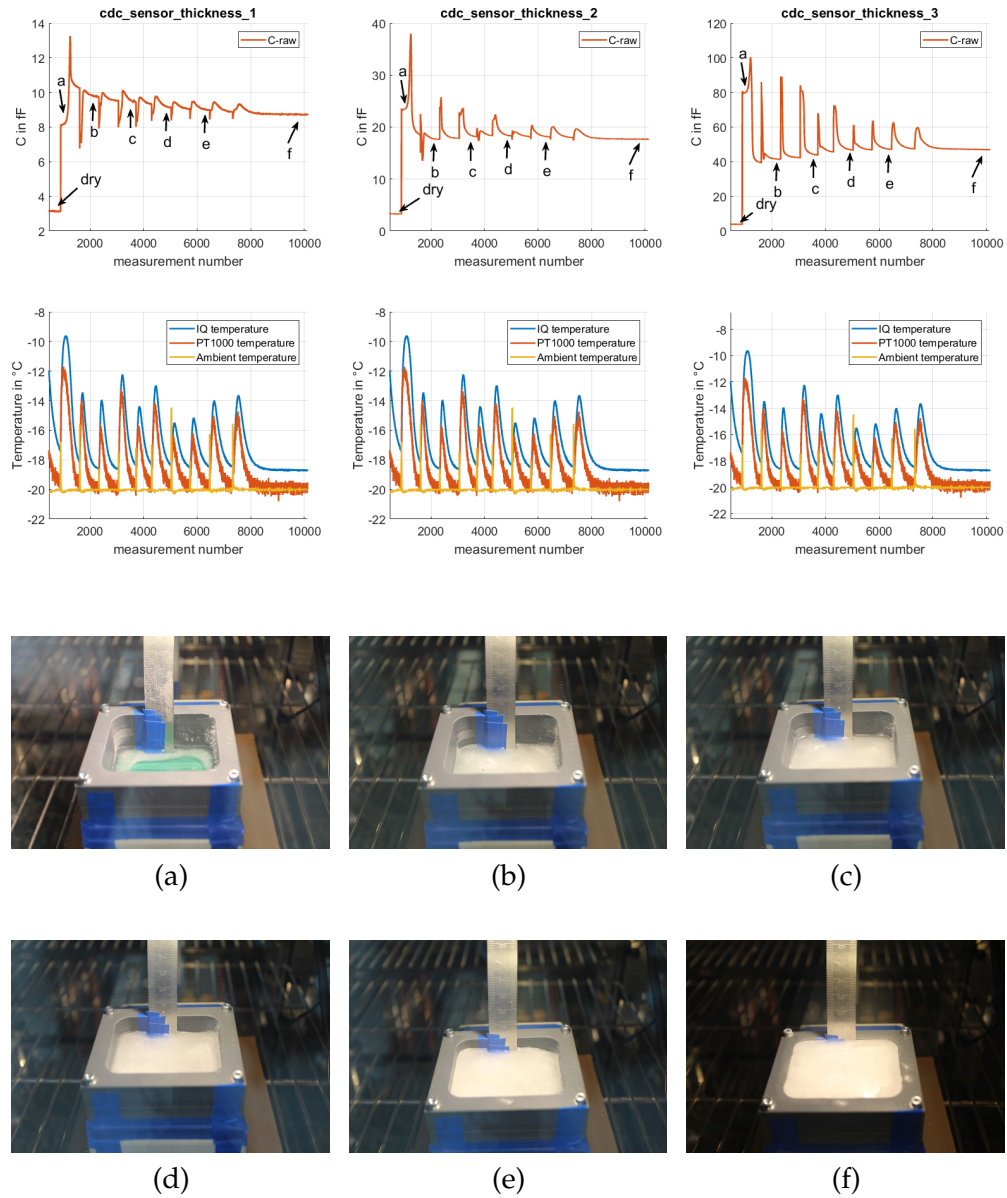


Abbildung 4.26: Messung mit unterschiedlichen Eisdicken. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Schätzung der Eisdicke (in den Bildern ist die Elektrode in der Mitte der Kunststoffumrandung). (a) Gefriervorgang, (b) bis (f) dicker werdende Eisschicht. Darstellung der Rohwerte.

4.8 Messung bei Raureif

In der folgenden Messung werden mithilfe eines Luftbefeuchters immer dickere Schichten von Raureif aufgetragen, um das Verhalten der Sensoren bei einer weiteren Eisart zu untersuchen. Die Temperatur wird dabei konstant auf -20 °C geregelt. In den folgenden Abbildungen wird – aus Übersichtgründen – nur auf Teilbereiche eingegangen.



Abbildung 4.27: Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, bedeckt mit Raureif. Der Luftbefeuchtereinlass ist rechts zu sehen.

4 Eis- und Wasser-Messungen

Es fällt auf, dass die Verteilung des Raureifs auf der Elektrodenfläche wesentlich gleichmäßiger als in Messung 4.6 ausfällt.

Im Vergleich zu den vorherigen Messungen fällt bei allen folgenden Darstellungen auf, dass der Ausschlag – der sich infolge des Raureifes ergibt – wesentlich geringer ausfällt als bei Versuchen mit Eis. Dies lässt sich durch die insgesamt kleinere Permittivität erklären, welche sich infolge der Lufteinschlüsse bei der Raureifbildung ergibt. Ansonsten verhalten sich die Kurvenverläufe recht ähnlich. In Abbildung 4.30 können sehr gut die, zuvor erwähnten (siehe Messung 4.6), unterschiedlichen Bereiche der drei Elektroden zur Messung der Eisdicke erkannt werden. Bei der Impedanz-Messung (siehe Abbildung 4.31) fällt erneut die Trennung der Kapazitätswerte bei unterschiedlichen Messfrequenzen auf (dies signalisiert den Zustand Eis). Dies ist korrekt, da es – wie in Abbildung 4.28 ersichtlich – am Anfang der Messung zur Eisbildung auf der Elektrodenfläche kommt.

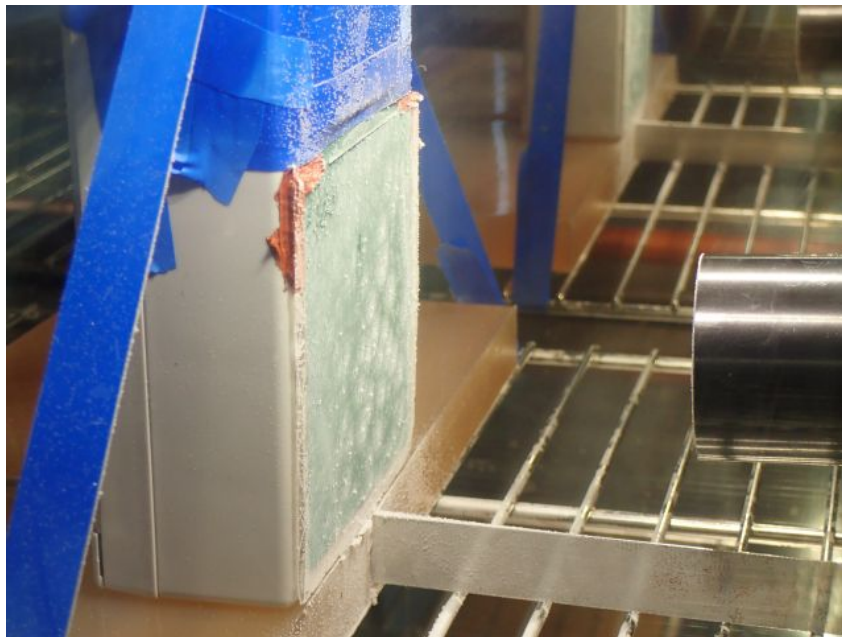


Abbildung 4.28: Eisbildung auf der Elektrodenfläche zu Beginn der Messung.

4 Eis- und Wasser-Messungen

Kennzeichnung	Schneedicke in mm an den dicksten Stelle
(a)	0
(b)	*
(c)	~2
(d)	~10
(e)	~25
(f)	~30

Tabelle 4.4: Dicke der Raureifschichten in den markierten Zuständen

Diese Messung wird durchgeführt, um das System auf eine weitere Eisart – nämlich den Raureif – zu untersuchen. Es kann gezeigt werden, dass die Kapazitätswerte kleiner ausfallen, aber die Kurven einen ähnlichen Verlauf zur vorherigen Messungen aufweisen. Insbesondere die deutlich erkennbaren Bereiche der einzelnen Elektroden zur Eisdicken-Messung und die sichtbare Eisdetektion des Impedanz-Messverfahrens fallen auf. Demnach kann gezeigt werden, dass das System auch bei Raureif funktionieren sollte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

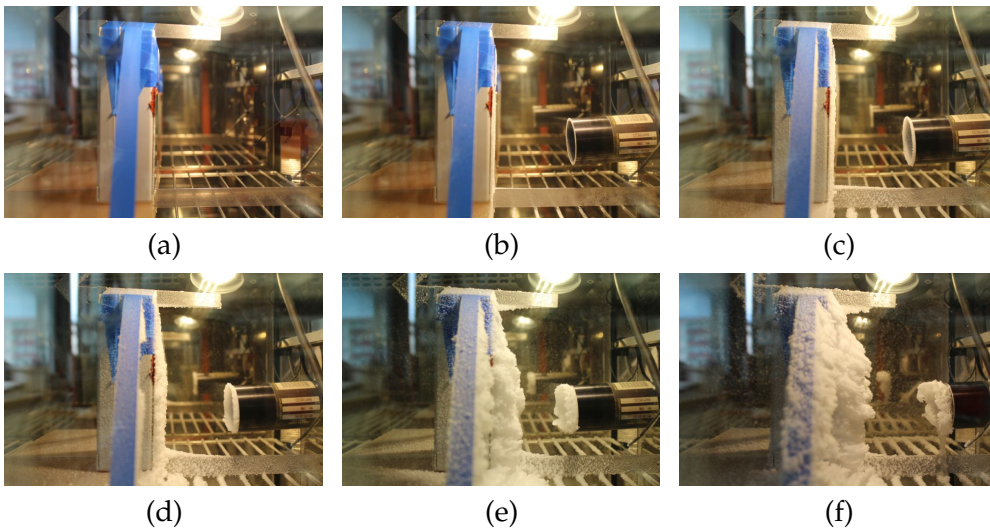
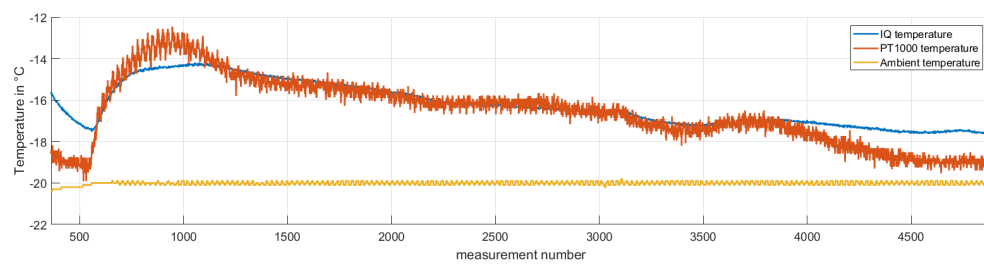
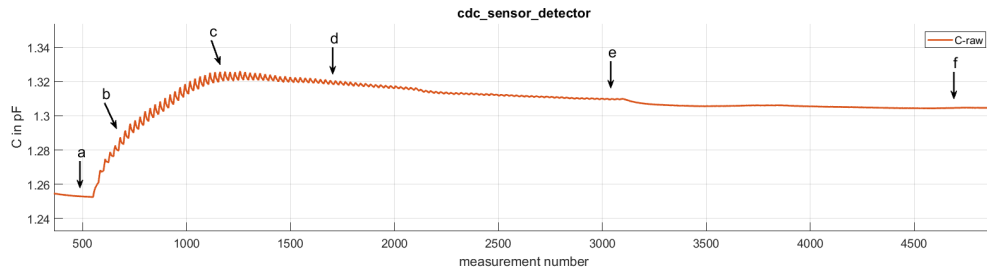


Abbildung 4.29: Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (die Elektrode befindet sich im unteren Bereich der Elektrodenplatte). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Darstellung der Rohwerte.

4 Eis- und Wasser-Messungen

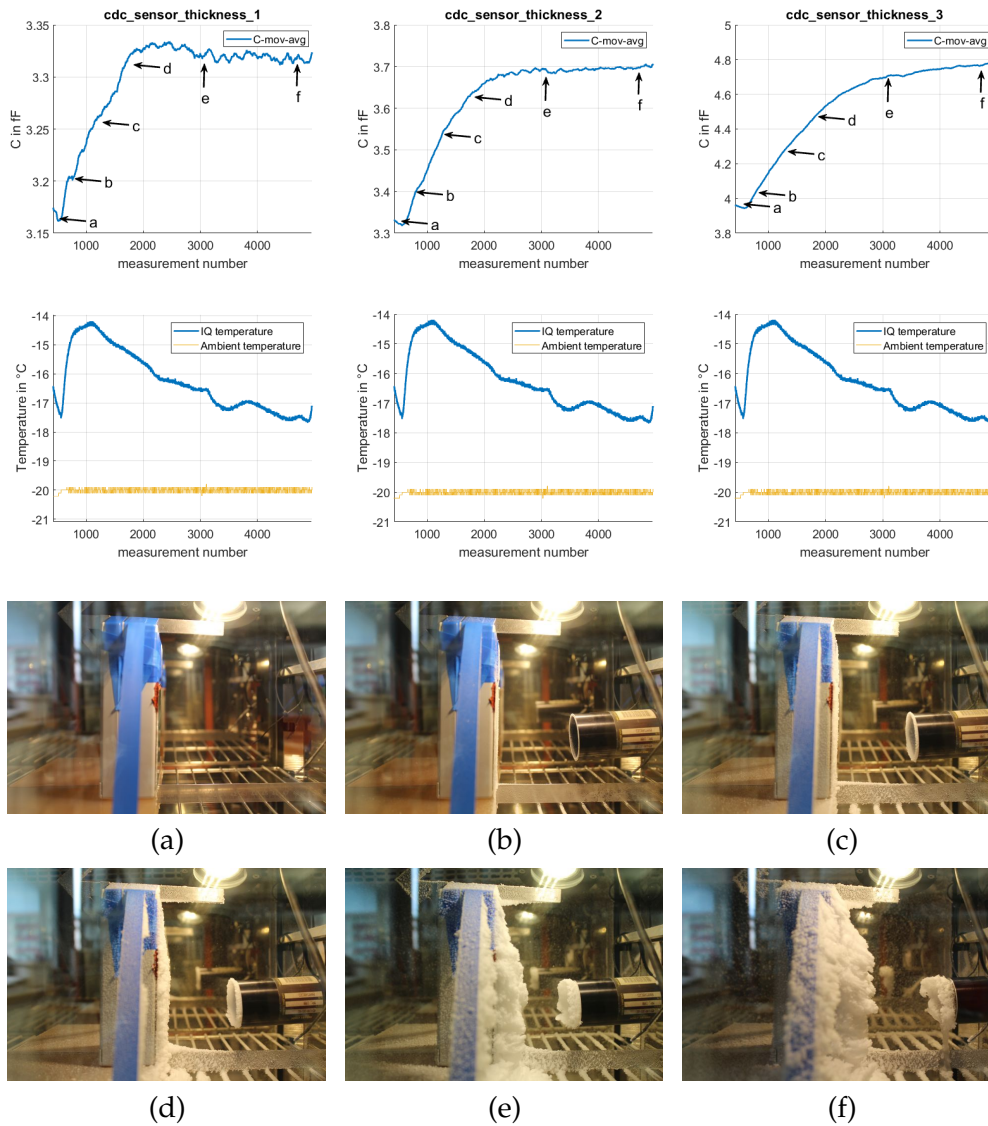


Abbildung 4.30: Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektroden für die Schätzung der Eisdicke (die Elektroden befinden sich im mittleren Bereich der Elektrodenplatine). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Auf die Werte ist ein gleitender Mittelwertfilter angewendet.

4 Eis- und Wasser-Messungen

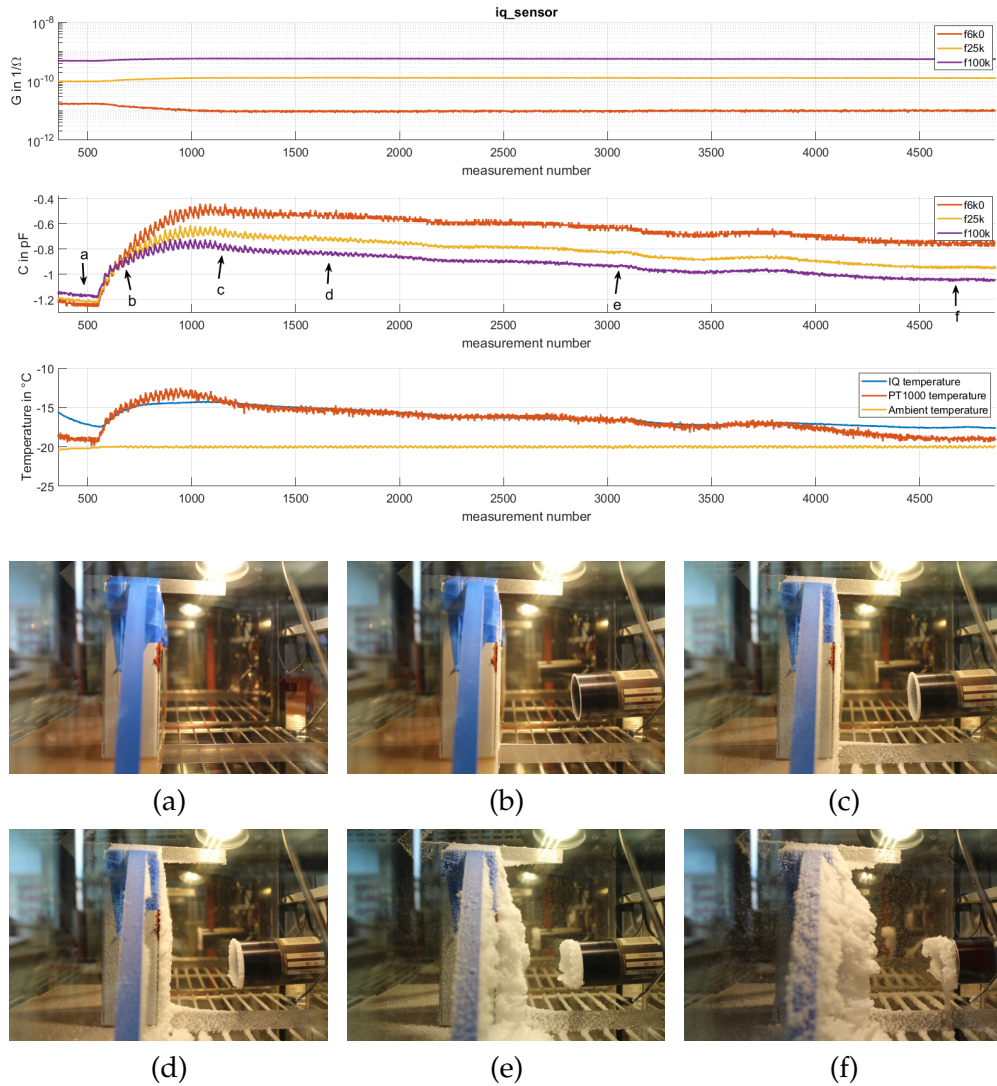


Abbildung 4.31: Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (die Elektrode befindet sich im oberen Bereich der Elektrodenplatte). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 30 pF).

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

In diesem Kapitel werden weitere Systembetrachtungen des Sensors behandelt.

Dabei wird zuerst der Stromverbrauch des Sensors und der einzelnen Komponenten untersucht und analysiert. Aus diesen Daten werden Hochrechnungen erstellt, um mithilfe des Akkus auf die mögliche Laufzeit zu schließen. Mit diesen Erkenntnissen kann die Frage beantwortet werden, ob das System auch längere Perioden (zum Beispiel einen Winter lang) ohne Solarzellen auskommen würde.

Im darauffolgenden Unterkapitel wird auf die autarke Energieversorgung mittels Solarzellen eingegangen. Dabei wird untersucht, wie viele Tage der Sensor im Sonnenlicht sein müsste, um den Akku wieder komplett aufzuladen. Hieraus lässt sich die Frage, ob eine autarke Versorgung über mehrere Jahre möglich ist, beantworten.

Im letzten Unterkapitel wird mit zwei Reichweitentests die mögliche Distanz zwischen Sensor und Basisstation untersucht.

5.1 Stromverbrauch

In diesem Unterkapitel wird der Stromverlauf des Gesamtsystems und einzelner Komponenten dargestellt und analysiert. Am Ende werden Hochrechnungen gemacht, um abschätzen zu können, wie lange das System ohne Solarzellen aus dem Akku versorgt werden kann.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

Die Software steuert dabei folgenden Ablauf:

- Temperaturmessung mithilfe des *PT1000*
- Impedanz-Messung bei 4 Messfrequenzen (1,2 kHz, 6 kHz, 25 kHz und 100 kHz jeweils für Referenz und Elektrode)
- Kapazitäts-Messung (jeweils für eine Referenz und vier Elektroden)
- Spannungsmessung des Li-Ionen Akkus
- Datenübertragung zur Basisstation (63 Bytes müssen übertragen werden)

Dieser Ablauf ist so gewählt, um einem realen Szenario möglichst nahe zu kommen. Einfachheitshalber werden jedoch nicht sämtliche im Kapitel 3.7.1 erwähnten Energiesparmaßnahmen, wie etwa das Wegfallen mancher Messungen bei warmen Temperaturen, umgesetzt.

Es werden alle Ströme über einen $10\ \Omega$ Widerstand mithilfe eines Oszilloskops gemessen. Die Versorgung des Systems erfolgt über 3,3 V aus dem Harvester-Chip. Für die Messung wird ein Picoscope 5444B mit einer Abtastrate von 125 MS/s und 15 Bit Auflösung verwendet.

Die verschiedenen Strom-Messpunkte sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

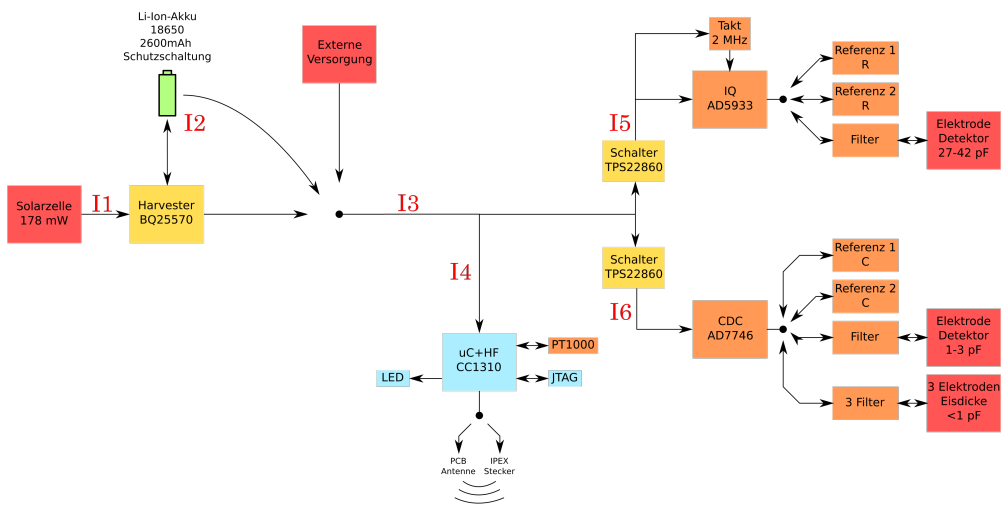


Abbildung 5.1: Blockdiagramm mit gekennzeichneten Strom-Messpunkten.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

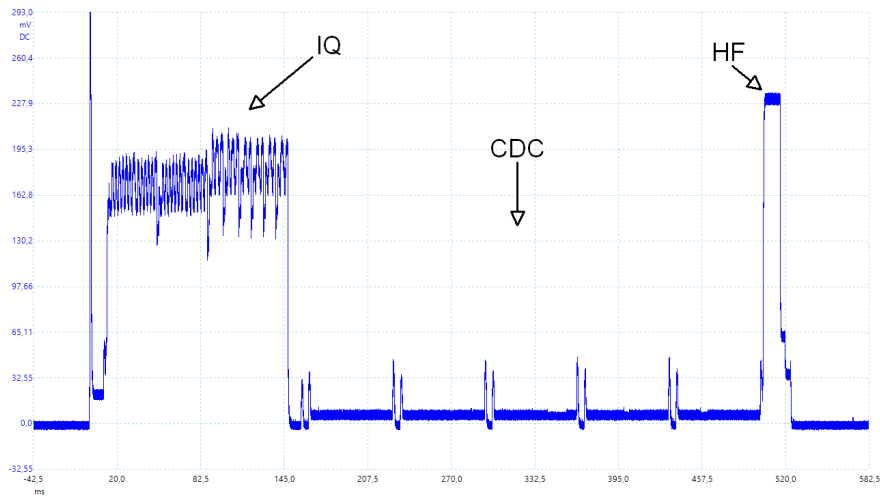


Abbildung 5.2: Messung des Stromverbrauchs des Gesamtsystems an Strom-Messpunkt I3. Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Dies ergibt im aktiven Zeitraum eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 5,62\ \text{mA}$ für eine Dauer von 528,2 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit $\pm 1\ \text{V}$ gewählt.

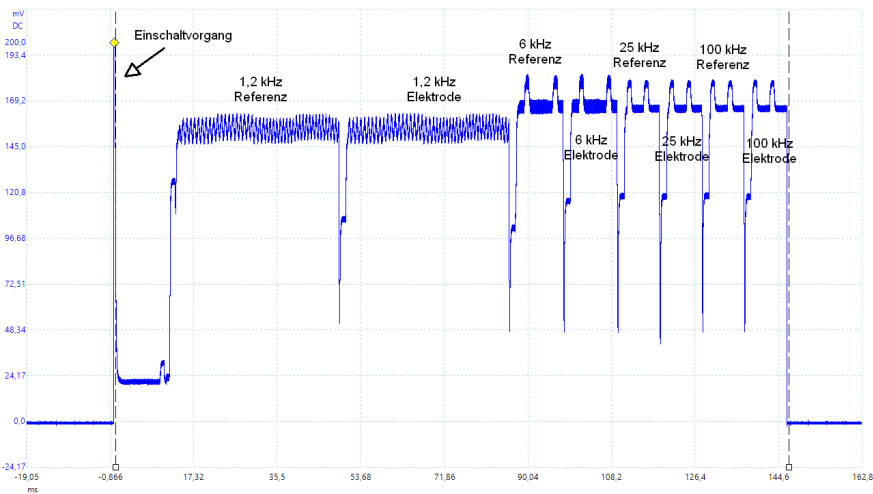


Abbildung 5.3: Messung des Stromverbrauchs des IQ an Strom-Messpunkt I5. Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 14,5\ \text{mA}$ für eine Dauer von 146,3 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit $\pm 200\ \text{mV}$ gewählt.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

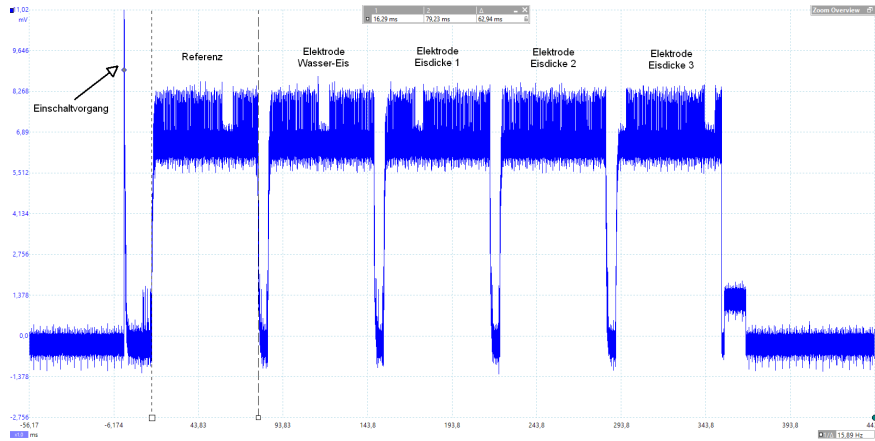


Abbildung 5.4: Messung des Stromverbrauches des CDC an Strom-Messpunkt I6. Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 650\ \mu\text{A}$ für eine Dauer von 62,94 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit $\pm 20\ \text{mV}$ gewählt.

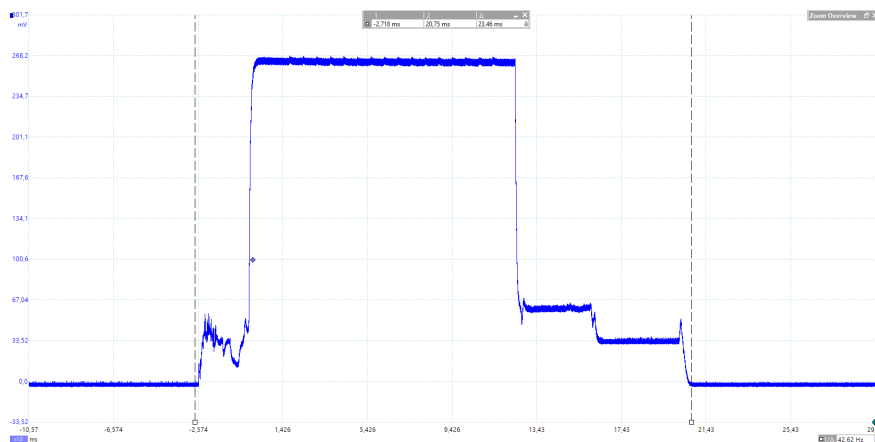


Abbildung 5.5: Messung des Stromverbrauches des Mikrocontrollers bei der Funkkommunikation an Strom-Messpunkt I4. Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 16\ \text{mA}$ für eine Dauer von 23,46 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit $\pm 500\ \text{mV}$ gewählt.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

In Abbildung 5.2 ist deutlich erkennbar, dass das IQ-Verfahren am meisten Strom benötigt. Dadurch ist es für zukünftige Anwendungen wesentlich, nur bei einzelnen aufgeteilten Frequenzen zu messen, um ein energieautarkes System realisieren zu können. In Abbildung 5.3 lassen sich die einzelnen Messphasen des IQ unterteilen. Es wird gezeigt, dass Messungen mit höheren Frequenzen erwartungsgemäß kürzer dauern und somit energiesparender sind. In Abbildung 5.4 fällt die insgesamt längere Messdauer und der geringe Stromverbrauch auf. Dabei ist erkennbar, dass das CDC-Verfahren in dieser Konfiguration $\sim 9 \times$ weniger Strom verbraucht als das IQ-Verfahren und damit ähnlich viel Energie benötigt wie die Kommunikationsphase des Mikrocontrollers (siehe Abbildung 5.5).

Der Ruhestrom wird mit einem Keithley 2100 gemessen und gemittelt und beträgt bei Messpunkt I3 $\sim 3 \mu\text{A}$. Durch die Schutzelektronik des Li-Ionen Akkus fließen zusätzliche $\sim 3 \mu\text{A}$, welche nicht in diesen Wert mit einfließen [34].

Nach der Formel 5.1 kann in weiterer Folge der Stromverbrauch berechnet werden [38]. Die Abtastrate beeinflusst naturgemäß den Stromverbrauch. Diese wird beispielhaft mit zwei Minuten angenommen. Des Weiteren wird angenommen, dass immer alle Messungen durchgeführt werden (dies muss bei wärmeren Temperaturen im Normalfall nicht gemacht werden). Die Ergebnisse sollen eine Größenordnung, aber keinesfalls genaue Ergebnisse präsentieren. Der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers fließt zuallererst nicht ein, um nur die Verbraucherseite zu beleuchten.

$$I = \frac{I_{ON} \cdot T_{ON} + I_{OFF} \cdot T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (5.1)$$

$$I = \frac{5,62 \text{ mA} \cdot 528,2 \text{ ms} + 3 \mu\text{A} \cdot (120 \text{ s} - 528,2 \text{ ms})}{120 \text{ s}} = 27,72 \mu\text{A} \quad (5.2)$$

Nach der Formel 5.3 kann nun die ungefähre Akkulebensdauer berechnet werden [38]. Die zusätzlichen $\sim 80 \%$ ergeben sich durch den Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers des Harvesters [35]. Die folgende Berechnung ist sehr einfach gehalten und vernachlässigt einige Einflüsse, wie beispielsweise die Temperatur oder die Selbstentladung des Akkus. Die Ergebnisse sollen eine Größenordnung, aber keinesfalls genaue Ergebnisse präsentieren.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

$$\text{Akkulebensdauer} = \frac{\text{Akku Kapazität}}{\frac{I_{ON} \cdot T_{ON} + I_{OFF} \cdot T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}}} \cdot \frac{1}{8760} \cdot 85\% \cdot 80\% \quad (5.3)$$

$$\text{Akkulebensdauer} = \frac{2600 \text{ mAh}}{\frac{5,62 \text{ mA} \cdot 528,2 \text{ ms} + 3 \mu\text{A} \cdot (120 \text{ s} - 528,2 \text{ ms})}{120 \text{ s}}} \cdot \frac{1}{8760} \cdot 85\% \cdot 80\% \quad (5.4)$$

$$\approx 7 \text{ Jahre} \quad (5.5)$$

Die Ergebnisse für weitere Abtastraten sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

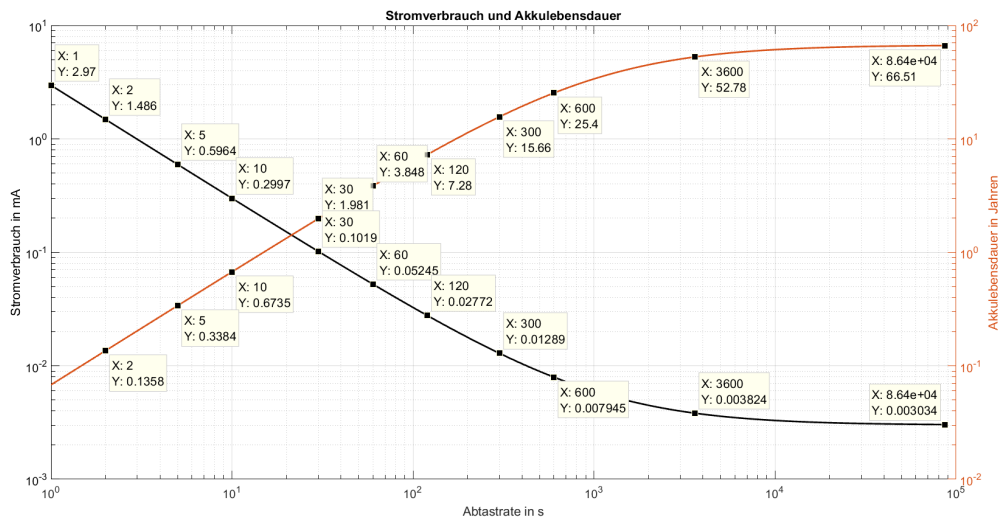


Abbildung 5.6: Hochrechnung des Stromverbrauches und der Akkulebensdauer bei verschiedenen Abtastraten. Die Akkukapazität beträgt 2600 mAh.

Es kann gezeigt werden, dass das IQ-Messverfahren selbst mit nur vier Messfrequenzen ungefähr den neunfachen Stromverbrauch des CDC-Messverfahrens aufweist. Durch Hochrechnungen (siehe Abbildung 5.6) kann gezeigt werden, dass der Sensor ab einer Abtastrate von ~ 30 s – in der gegebenen Konfiguration – über ein Jahr mit dem Akku versorgt werden kann. Es sei aber darauf hingewiesen, dass alle verwendeten Formeln stark vereinfacht sind und keine Temperatureinflüsse, Selbstentladungen und weitere Wirkungsgrade berücksichtigt werden.

5.2 Autarke Energieversorgung

In diesem Unterkapitel wird die autarke Energieversorgung des Sensors behandelt. Dabei wird die Versorgung mit zwei Solarzellen und das Zusammenspiel mit dem Harvester-Chips analysiert. Am Ende werden Hochrechnungen gemacht, um abschätzen zu können, ob das System sich autark versorgen kann.

Für die Messung werden der Sensor und die Messelektronik auf einer Dachterrasse der Technischen Universität Graz positioniert. Es werden für die Dauer von mehr als einer Stunde – bei unterschiedlicher Bewölkung – verschiedene Systemgrößen gemessen. Die Messung findet Ende Mai statt.

Der Strom wird über einen $10\ \Omega$ Widerstand mithilfe eines Oszilloskops gemessen. Für die Messung wird ein Picoscope 5444B mit einer Abtastrate von $1\ \text{kS/s}$, einer 14 Bit Auflösung und einem Eingangsspannungsbereich von $\pm 5\ \text{V}$ verwendet. Die Versorgung des Systems erfolgt über $3,3\ \text{V}$ aus dem Harvester-Chip, die Abtastrate des Sensors wird mit $5\ \text{s}$ gewählt. Die Akkuspannung beträgt während dieser Messung $\sim 3,58\ \text{V}$.

Die verschiedenen Messpunkte sind Abbildung 5.1 dargestellt.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite



Abbildung 5.7: Messaufbau auf der Dachterrasse der Technischen Universität Graz.



Abbildung 5.8: (links) Foto vom Beginn der Messung bei leichter Bewölkung. (rechts) Foto vom Ende der Messung bei starker Bewölkung.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

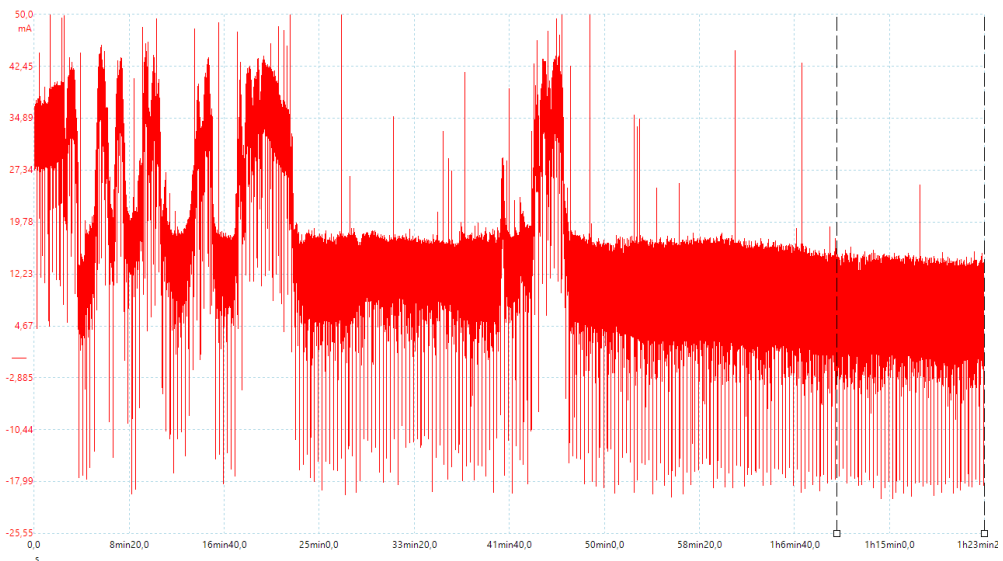
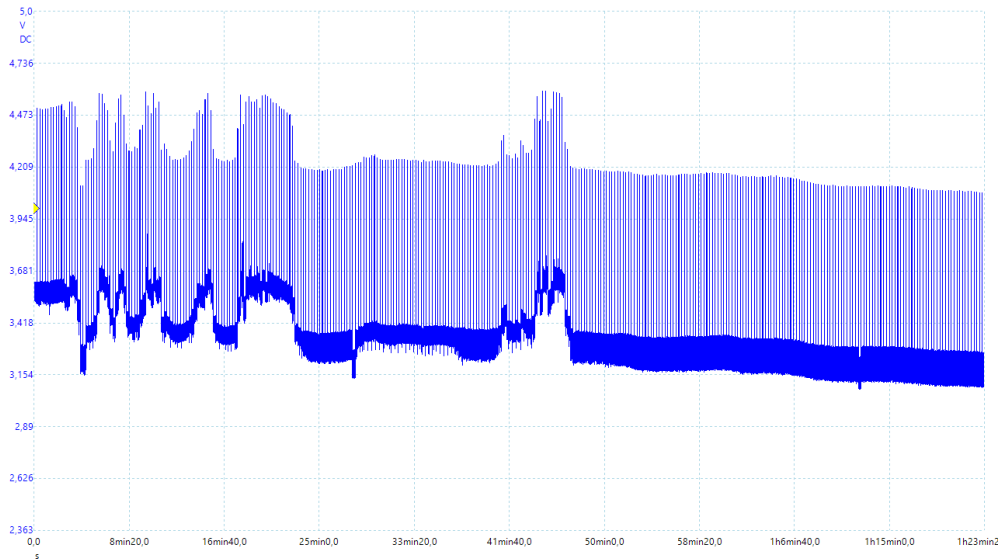


Abbildung 5.9: (oben) Messung der Solarzellenspannung am Punkt $I1$. (unten) Messung des Li-Ionen Stromes an Strom-Messpunkt $I2$, dabei fließen positive Ströme in den Li-Ionen Akku. Über die gesamte Dauer ergibt sich ein durchschnittlicher Ladestrom von $\sim 14,16$ mA. Im markierten Bereich ergibt sich bei starker Bewölkung ein durchschnittlicher Ladestrom von $\sim 4,69$ mA.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

In Abbildung 5.9 ist die Solarzellenspannung zu erkennen. Die periodischen Spitzen, die alle ~ 14 s auftreten, entstehen bei der Suche des Harvesters nach dem optimalen Leistungspunkt der Solarzelle. Dafür muss die Leerlaufspannung der Solarzelle gemessen werden (siehe Kapitel 3.5). Des Weiteren sind verschiedene Spannungsbereiche erkennbar, welche auf den unterschiedlichen Bewölkungsgrad zurückzuführen sind. Der Stromverlauf zeigt dieselbe Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad. Es wird gezeigt, dass selbst im stark bewölkten Zustand – gegen Ende der Messung – ein durchschnittlicher Ladestrom von $\sim 4,69$ mA zustande kommt.

$$P_{\text{durchschnitt}} = U_{\text{Li-Ionen}} \cdot I_{\text{Li-Ionen,durchschnitt}} = 3,58 \text{ V} \cdot 14,16 \text{ mA} \approx 51 \text{ mW} \quad (5.6)$$

$$P_{\text{max}} = U_{\text{Li-Ionen}} \cdot I_{\text{Li-Ionen,max}} = 3,58 \text{ V} \cdot 35 \text{ mA} \approx 125 \text{ mW} \quad (5.7)$$

$$P_{\text{min}} = U_{\text{Li-Ionen}} \cdot I_{\text{Li-Ionen,min}} = 3,58 \text{ V} \cdot 4,69 \text{ mA} \approx 17 \text{ mW} \quad (5.8)$$

Vereinfacht kann die Anzahl der Tage für eine vollständige Akkuladung berechnet werden. Hierzu wird von den im Testszenario vorkommenden Lichtverhältnissen und 8 h Licht pro Tag ausgegangen. Die folgende Berechnung ist sehr einfach gehalten und vernachlässigt einige Einflüsse, wie beispielsweise die Temperatur. Die Ergebnisse sollen eine Größenordnung, aber keinesfalls genaue Ergebnisse präsentieren.

$$\text{Ladedauer} = \frac{\text{Akku Kapazität}}{I_{\text{Li-Ionen,durchschnitt}}} \cdot \frac{1}{8} = \frac{2600 \text{ mAh}}{14,16 \text{ mA}} \cdot \frac{1}{8} \approx 23 \text{ Tage} \quad (5.9)$$

Es kann gezeigt werden, dass eine autarke Versorgung des Sensors mit Solarzellen – bei normalen mitteleuropäischen Lichtverhältnissen und direkter Sonneneinstrahlung – gut möglich sein sollte, da von jährlich mehr als 23 Sonnentagen ausgegangen werden kann. Es sei aber darauf hingewiesen, dass alle verwendeten Formeln stark vereinfacht sind und keine Temperatureinflüsse, Selbstentladungen und weitere Wirkungsgrade berücksichtigt werden.

5.3 Reichweitentest

In diesem Unterkapitel werden zwei Reichweitentests – also die sichere Datenübertragung zwischen Sensor und Basisstation – gezeigt. Einige grundlegende Theorien und Tests sind unter [39] zu finden.

Die Reichweite wird bei diesen Tests mit einem GPS gemessen. Dadurch ergeben sich Ungenauigkeiten von einigen Metern. Des Weiteren werden die Tests am Vormittag bei leicht feuchtem Gras und Bewölkung durchgeführt. Das System wird direkt von dem Li-Ionen Akku versorgt (ohne DC/DC-Wandler). Die Sendeleistung beträgt sowohl bei dem Sensor als auch bei der Basisstation ~ 12 dBm.



Abbildung 5.10: Darstellung der verwendeten Geräte. Oben ist das GPS, links unten der Sensor und rechts unten die Basisstation – betrieben mithilfe eines Akkus – zu sehen.

Es kann gezeigt werden, dass Reichweiten von $\sim 1,4$ km mit diesem System bei direktem Sichtkontakt und entsprechender Ausrichtung der Komponenten möglich sind. Für zukünftige Anwendungen kann die Sendeleistung reduziert werden, um den Stromverbrauch weiter zu verringern.

5 Stromverbrauch, autarke Energieversorgung und Reichweite

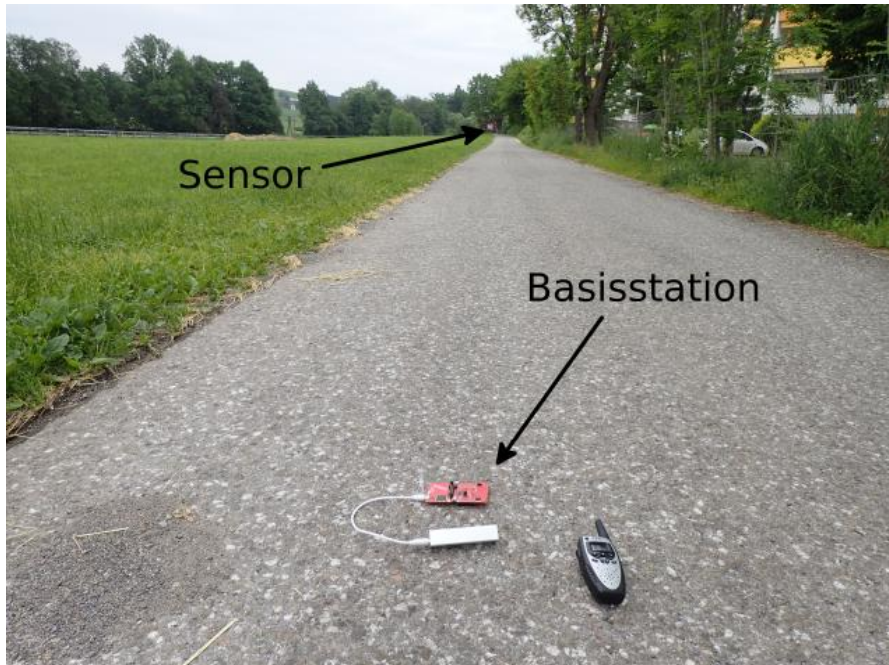


Abbildung 5.11: Reichweitentest bei 180 m Distanz zwischen Sensor und Basisstation. Keine Kommunikationsprobleme in allen Ausrichtungen des Sensors und der Basisstation.

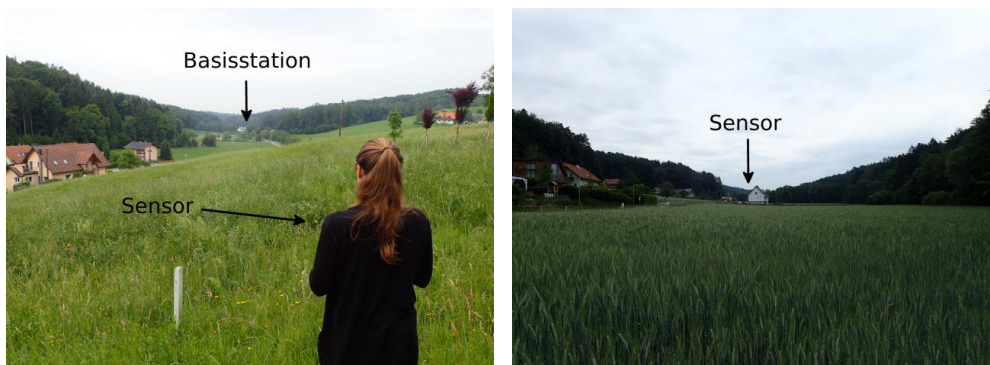


Abbildung 5.12: Reichweitentest bei 1430 m Distanz zwischen Sensor und Basisstation. Teilweise Kommunikationsausfälle bei gewissen Ausrichtungen des Sensors und der Basisstation.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein energieautarkes Gerät entwickelt, um mithilfe von Elektroden Wasser und Eis zu unterscheiden und bei vorhandenem Eis auf die Eisdicke rückschließen zu können. Dazu werden zwei unabhängige Messsysteme, welche auf unterschiedlichen Verfahren basieren, angewendet. Diese beruhen auf der Kapazitäts- und auf der Impedanz-Messung.

Es kann gezeigt werden, dass mit dem kapazitiven Messverfahren zwischen Eis und Wasser unterschieden werden kann. Durch die relativ hochauflösende Messung können selbst kleine Kapazitätsänderungen detektiert werden – dies kann für die Messung der Eisdicke genutzt werden. In weiterer Folge kann gezeigt werden, dass in Testabläufen auf die Eisdicke rückgeschlossen werden kann. Der unterschiedliche Einfluss der Verschiebestrome zur umliegenden Massefläche muss dabei immer berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass dieses Messverfahren – über einen längeren Zeitraum und bei unterschiedlichen Temperaturen – aufgrund eines benötigten Bezugspunktes (Elektrode im trockenen Zustand) relativ stabil sein muss. Das Kapazitäts-Verfahren ist eine Herausforderung in Hinblick auf den Algorithmus für die Wasser-Eis-Unterscheidung, da die gleichen Kapazitätswerte durch unterschiedliche Aggregatzustände auftreten können.

Auch beim Impedanz-Messverfahren wird gezeigt, dass eine Wasser-Eis-Unterscheidung in allen durchgeführten Szenarien verlässlich möglich ist. Dies wird durch unterschiedliche Messwerte der Kapazität bzw. des Leitwertes bei verschiedenen Messfrequenzen ermöglicht. Es wird empfohlen, dass mindestens drei weit verteilte Messfrequenzen gewählt werden (zum Beispiel 5 kHz, 25 kHz und 100 kHz), um eine mögliche Überschneidung zweier Kapazitätswerte – infolge der Änderung der Verschiebestrome bei gewissen Eisflächen – und damit eine falsche Interpretation der Daten auszuschließen. Ein Vorteil der Impedanz-Messung ist, dass die Information über den Wasser-Eis-Zustand in der Relation der Werte zueinander liegt. Dadurch kann ein größerer Temperatur- bzw. Langzeit-Drift – als beim Kapazitäts-

6 Zusammenfassung

Messverfahren – in Kauf genommen werden. Im Gegensatz zum Kapazitätskann beim Impedanz-Messverfahren wesentlich leichter und bereits mit nur einer Messung zwischen Wasser und Eis unterschieden werden. Die Verschiebung der Permittivitäts- und Leitwert-Kurve hin zu höheren Frequenzen bringt den Vorteil, dass die zu messenden Frequenzen höher angesiedelt und dadurch gegebenenfalls ohne externen Takt wie auch energiesparender zu messen sind.

Da das verwendete Impedanz-Messsystem die Einschränkung mit sich bringt, keine kleineren Kapazitätsänderung im Sub-Femtofarad-Bereich detektieren zu können, eignet sich das System nicht für die Eisdicken-Messung. Diese Einschränkung kann durch das Kapazitäts-Messverfahren kompensiert werden. Die leichtere Auswertung der Daten wiederum hebt die positiven Seiten des Impedanz-Messverfahrens hervor. Es kann insgesamt gezeigt werden, dass sich beide Verfahren sehr gut ergänzen und in Kombination eine noch zuverlässigere Eisdetektion möglich ist.

Des Weiteren wird in der vorliegenden Arbeit der Stromverbrauch des Systems und einzelner Komponenten analysiert und optimiert. Daraus kann berechnet werden, dass das System in einer praxistauglichen Konfiguration ohne Zuhilfenahme der Solarzellen über mehr als ein Jahr mit dem Li-Ionen Akku versorgt werden kann. In einer weiteren Messung wird die aus den Solarzellen gewonnene Energie an einem bewölkten Tag gemessen. Daraus wird berechnet, dass weniger als ein leicht bewölktes Monat nötig ist, um das System mit ausreichend Energie für ein Jahr zu versorgen. Dadurch kann gezeigt werden, dass eine autarke Energieversorgung über mehrere Jahre mithilfe der Solarzellen möglich ist. In einem letzten Test kann die mögliche Reichweite von mehr als 1,4 km zwischen Gerät und Basisstation gezeigt werden.

Literatur

- [1] Matthew C. Homola, Per J. Nicklasson und Per A. Sundsbø. »Ice sensors for wind turbines«. In: *Cold Regions Science and Technology* (2006) (siehe S. 2, 4).
- [2] M. J. Moser u. a. »Strong and Weak Electric Field Interfering: Capacitive Icing Detection and Capacitive Energy Harvesting on a 220-kV High-Voltage Overhead Power Line«. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (2011) (siehe S. 2, 6, 7, 12–14).
- [3] Umair Mughal, Muhammad Virk und Mohamad Mustafa. »State of the Art Review of Atmospheric Icing Sensors«. In: *Sensors and Transducers* (2016) (siehe S. 4).
- [4] Umair N. Mughal und Muhammad S. Virk. »Atmospheric Icing Sensors – An Insight«. In: *SENSORCOMM* (2013) (siehe S. 4).
- [5] Umair N. Mughal, Muhammad S. Virk und Mohamad Y. Mustafa. »Review of Capacitive Atmospheric Icing Sensors«. In: *SENSORCOMM* (2012) (siehe S. 4).
- [6] M. Flatscher, M. Neumayer und T. Bretterklieber. »Field Sensor Analysis for Electrical Impedance Spectroscopy based Ice Detection«. In: 2017 (siehe S. 4–6, 9, 44).
- [7] V. G. Artemov und A. A. Volkov. »Water and Ice Dielectric Spectra Scaling at 0C«. In: *Ferroelectrics* (2014) (siehe S. 5, 8).
- [8] V. G. Artemov, I. A. Ryzhkin und V. V. Sinitsyn. »Similarity of the dielectric relaxation processes and transport characteristics in water and ice«. In: *JETP Letters* (2015) (siehe S. 5, 8, 11).
- [9] M. Flatscher u. a. »Measurement of complex dielectric material properties of ice using electrical impedance spectroscopy«. In: *2016 IEEE SENSORS*. 2016 (siehe S. 5, 11).

Literatur

- [10] M. J. Moser u. a. »Capacitive icing measurement in a 220 kV overhead power line environment«. In: *2010 IEEE Sensors*. 2010 (siehe S. 6).
- [11] M. Moser u. a. »An autonomous sensor system for monitoring of high voltage overhead power supply lines«. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* (2009) (siehe S. 6).
- [12] H. Zangl, T. Bretterkieber und G. Brasseur. »Energy Harvesting for Online Condition Monitoring of High Voltage Overhead Power Lines«. In: *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2008 (siehe S. 6).
- [13] M. J. Moser u. a. »Icing detector for overhead power transmission lines«. In: *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2009 (siehe S. 6).
- [14] Umair N. Mughal und Beibei Shu. »Using AD5933 IC to Measure Dielectric Constant Variation of Atmospheric Ice«. In: *SENSORCOMM* (2016) (siehe S. 6).
- [15] Matthias Flatscher, Markus Neumayer und Thomas Bretterkieber. »Maintaining Critical Infrastructure Under Cold Climate Conditions: A Versatile Sensing and Heating Concept«. In: *Sensors and Actuators A: Physical* (2017) (siehe S. 6).
- [16] M. Flatscher u. a. »De-icing system with integrated ice detection and temperature sensing for meteorological devices«. In: *2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. 2015 (siehe S. 6).
- [17] Guillermo Barrenetxea u. a. »The Hitchhiker’s Guide to Successful Wireless Sensor Network Deployments«. In: *Proceedings of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*. 2008 (siehe S. 7, 16, 28).
- [18] G. Barrenetxea u. a. »SensorScope: Out-of-the-Box Environmental Monitoring«. In: *2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008)*. 2008 (siehe S. 7).
- [19] Kirk Martinez, Jane K. Hart und Royan Ong. »Deploying a Wireless Sensor Network in Iceland«. In: *GeoSensor Networks: Third International Conference, GSN 2009, Oxford, UK, July 13-14, 2009. Proceedings*. 2009 (siehe S. 7, 16, 28).

Literatur

- [20] T. Bretterklieber u. a. »A Dependable Wireless Sensor Node with Solar Cell Harvesting for Harsh Environments«. In: *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*. 2015 (siehe S. 7).
- [21] Richard Hartinger. »Solarbetriebene drahtlose Sensorknoten«. Bachelorarbeit. Technische Universität Graz, 2014 (siehe S. 7, 25).
- [22] D. Pimentel, P. Musilek und A. Knight. »Energy harvesting simulation for Automatic Arctic monitoring stations«. In: *2010 IEEE Electrical Power Energy Conference*. 2010 (siehe S. 7).
- [23] Dr. Harald Hartl u. a. *Elektronische Schaltungstechnik*. Pearson, 2008 (siehe S. 12, 19).
- [24] T. Bretterklieber u. a. »Model based monitoring of ice accretion on overhead power lines«. In: *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. 2016 (siehe S. 12).
- [25] Texas Instruments. *Diversifying the IoT with Sub-1 GHz technology*. URL: <http://www.ti.com/lit/wp/swry017/swry017.pdf> (besucht am 17.05.2017) (siehe S. 16, 28).
- [26] Texas Instruments. *TI Low Power RF — Designer's Guide to LPRF*. URL: <http://www.ti.com/lit/sg/slya020a/slya020a.pdf> (besucht am 17.05.2017) (siehe S. 16, 28).
- [27] Texas Instruments. *CC1310 Launchpad*. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/swru477/swru477.pdf> (besucht am 17.05.2017) (siehe S. 16, 28).
- [28] Analog Devices. *AD7746 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor*. URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7745_7746.pdf (besucht am 01.06.2017) (siehe S. 18, 19).
- [29] Analog Devices. *AD5933 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer*. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf> (besucht am 01.06.2017) (siehe S. 20, 21).
- [30] Analog Devices. *AD5933 Evaluation Board User Guide*. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/UG-364.pdf> (besucht am 01.06.2017) (siehe S. 20, 21).

Literatur

- [31] Analog Devices. *AD5933 AN-1252*. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1252.pdf> (besucht am 01.06.2017) (siehe S. 20, 21).
- [32] Matthias Rath. »Sensor Modeling and Optimization for Capacitive Ice Sensing«. Masterarbeit. Technische Universität Graz, 2016 (siehe S. 21).
- [33] Multi Circuit Boards. *Lagenaufbau-Beispiel 4 Lagen*. URL: <https://www.multi-circuit-boards.eu/leiterplatten-design-hilfe/lagenaufbau/prototypen.html> (besucht am 18.05.2017) (siehe S. 23).
- [34] RS. *18650 Lithium-Ionen-Akku 3.7V, 2600mAh*. URL: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1427/0900766b814277dd.pdf> (besucht am 31.05.2017) (siehe S. 25, 84).
- [35] TI. *bq25570 Nano Power Boost Charger and Buck Converter for Energy Harvester Powered Applications*. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf> (besucht am 31.05.2017) (siehe S. 25, 84).
- [36] IXYS. *SLMD121H04L*. URL: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/SLMD121H04L_Nov16.pdf (besucht am 31.05.2017) (siehe S. 25).
- [37] TI. *CC1310 SimpleLink Ultra-Low-Power Sub-1 GHz Wireless MCU*. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf> (besucht am 01.06.2017) (siehe S. 26).
- [38] TI. *Humidity and Temperature Sensor Node for Sub-1GHz Star Networks Enabling 10+ Year Coin Cell Battery Life*. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/tidu995d/tidu995d.pdf> (besucht am 03.06.2017) (siehe S. 84).
- [39] TI. *Achieving Optimum Radio Range*. URL: <http://www.ti.com/lit/an/swra479/swra479.pdf> (besucht am 03.06.2017) (siehe S. 90).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität und des Leitwertes von Wasser und Eis bei 0 °C [6]	4
2.1	Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität und des Leitwertes von Wasser und Eis bei 0 °C [6]	9
2.2	Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität von Wasser und Eis bei unterschiedlichen Temperaturen. Adaptiert von [8].	11
2.3	Frequenzabhängigkeit des Leitwertes von Wasser und Eis bei unterschiedlichen Temperaturen. Adaptiert von [8].	11
2.4	Grundprinzip der Elektrode. Ein Plattenkondensator wird auf eine gerade Sensorfläche aufgefalt. [24]	12
2.5	Aufbau und Darstellung der Verschiebestrome einer Elektrode bei unterschiedlichen Luft-/Wasser-/Eis-Schichten. Es wird ersichtlich, dass für Stoffe mit hoher Permittivität, wie etwa Wasser, die Verschiebestrome direkt zu Masse gehen. Daraus ergibt sich eine kleinere Kapazität. [2]	14
3.1	Blockschaltbild des Gesamtaufbaus	15
3.2	(links) Sensor mit Solarzellen und Elektroden, (rechts) geöffneter Sensor mit Li-Ionen Akku	16
3.3	Blockschaltbild des Sensors	17
3.4	Innenaufbau des Sensors	17
3.5	(links) drei unabhängige Messelektroden umgeben von Massefläche, (rechts) mit Maßen in mm	22
3.6	Fläche unter der Elektrode	23
3.7	Lagenaufbau der FR4 Leiterplatte [33]	23
3.8	Foto der Elektrode mit Glasschutz	24
3.9	Blockschaltbild des Sensors mit Datenverbindungen und Strom-Messpunkten	26

Abbildungsverzeichnis

3.10	PT1000 (in der Mitte sichtbar) und die elektrischen Verbindungen – realisiert mit Stiftleisten – auf der Innenseite des Gehäuses (angebracht auf der Rückseite der Elektrodenplatine).	27
3.11	Gesamtaufbau des Systems. Sensor (links im Bild), Basisstation (rechts im Bild) und der Computer (teilweise unten im Bild). .	30
4.1	Übersicht der Elektroden. Die verwendeten Messverfahren zu den drei Elektroden sind jeweils links dargestellt. Rechts ist der angedachte Verwendungszweck zugeordnet. Die Elektrode zur Eisdicken-Messung ist in drei weitere Subelektroden unterteilt. In allen weiteren Messungen wird die mit den Pfeilen dargestellte Reihenfolge eingehalten.	33
4.2	Messelektroden mit Kunststofffolien und Kunststoffstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte. .	37
4.3	Messelektrode mit Kunststoffstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte. Bei den dünneren Kunststofffolien kann keine nennenswerte Änderung festgestellt werden.	38
4.4	Messelektroden mit nassen Papierstücken. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (oben) und die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (unten) jeweils bei Raumtemperatur (im Bild (a) sind die Elektroden rot markiert, dabei ist die Elektrode rechts oben (Wasser-Eis) und links unten (Eisdicke) zu sehen). Darstellung der Rohwerte.	39
4.5	Messelektroden mit Wassertropfen. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.	40
4.6	Messelektroden mit Wassertropfen. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung bei Raumtemperatur (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.	41

Abbildungsverzeichnis

4.7	Messelektroden mit Wasserfilm. Die Messwerte zeigen die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (oben) und die Ergebnisse der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (mittig) jeweils bei Raumtemperatur (im Bild (a) sind die Elektroden rot markiert, dabei ist die Elektrode oben (Wasser-Eis) und unten (Eisdicke) zu sehen). Darstellung der Rohwerte.	42
4.8	Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer bedeckt mit Wassertropfen.	43
4.9	Messung mit Eisbildung. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d)(e) Eis, (f) beim Auftauen. Darstellung der Rohwerte. . . .	46
4.10	Messung mit Eisbildung. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d)(e) Eis, (f) beim Auftauen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 34 pF).	47
4.11	Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, Elektrodenfläche bedeckt mit Eisfilm.	48
4.12	Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) fast aufgetaut. Darstellung der Rohwerte.	51
4.13	Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Eisdicken-Messung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) fast aufgetaut. Darstellung der Rohwerte.	52
4.14	Messung mit Eisfilm. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) kein Eis, (b) Vereisung beginnt, (c)(d) Eis, (e) beim Auftauen, (f) aufgetaut. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 25 pF).	53
4.15	Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, Elektrodenfläche bedeckt mit Eisfläche.	54

Abbildungsverzeichnis

4.16	Messung mit unterschiedlichen Wassertropfen. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelner Wassertropfen, (b) einzelner Eistropfen, (c) einzelner kleiner Eistropfen, (d) mehrere Eistropfen in einer Linie, (e) mehrere Eistropfen in mehreren Linien, (f) einzelner großer Eistropfen. Darstellung der Rohwerte.	58
4.17	Messung mit unterschiedlich großen Wasser-Eis-Flächen. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte.	59
4.18	Messung mit unterschiedlichen Wassertropfen. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelner Wassertropfen, (b) einzelner Eistropfen, (c) einzelner kleiner Eistropfen, (d) mehrere Eistropfen in einer Linie, (e) mehrere Eistropfen in mehreren Linien, (f) einzelner großer Eistropfen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 29 pF).	60
4.19	Messung mit unterschiedlich großen Wasser-Eis-Flächen. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 29 pF).	61
4.20	(links) Setup des Versuchsaufbaus mit Lackierpistole. (rechts) Gerät stehend mit Sprühdüse in Klimakammer.	62
4.21	Messung mit unterschiedlichen Wasser- bzw. Eis-Tropfen und Schichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für Wasser-Eis-Unterscheidung (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelne Eistropfen, (b) mehrere Eistropfen, (c) größte Eisschicht, (d) kleinere Eisschicht, (e) Eisschicht fast geschmolzen, (f) einzelne Wassertropfen. Darstellung der Rohwerte.	65

Abbildungsverzeichnis

4.22	Messung mit unterschiedlichen Wasser- bzw. Eis-Tropfen und Schichten. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (im Bild (a) ist die Elektrode rot markiert). (a) einzelne Eistropfen, (b) mehrere Eistropfen, (c) größte Eisschicht, (d) Eisschicht beim Schmelzen, (e) Eisschicht beim Schmelzen, (f) einzelne Wassertropfen. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 31 pF). . . .	66
4.23	(links) Gerät stehend mit Sprühdüse in Klimakammer. (rechts) Eisbildung auf Elektrodenfläche.	67
4.24	Messung mit unterschiedlichen Wasser-/Eis-Tropfen und Schichten. Messwerte der CDC-Elektrode für die Schätzung der Eisdicke sind dargestellt (Elektrode ist dabei ungefähr auf der Höhe der größten Eisschicht). (a) bis (f) dicker werdende Eisschicht. Die Rohwerte sind dargestellt.	69
4.25	(links) Gerät mit Kunststoffumrandung auf der Elektrodenfläche und Lineal zur Messung der Eisdicke in der Klimakammer. (rechts) Dicke Eisschicht in der Kunststoffumrandung. . .	70
4.26	Messung mit unterschiedlichen Eisdicken. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Schätzung der Eisdicke (in den Bildern ist die Elektrode in der Mitte der Kunststoffumrandung). (a) Gefriervorgang, (b) bis (f) dicker werdende Eisschicht. Darstellung der Rohwerte.	73
4.27	Versuchsaufbau. Gerät in Klimakammer, bedeckt mit Raureif. Der Luftbefeuchtereinlass ist rechts zu sehen.	74
4.28	Eisbildung auf der Elektrodenfläche zu Beginn der Messung. . .	75
4.29	Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektrode für die Wasser-Eis-Unterscheidung (die Elektrode befindet sich im unteren Bereich der Elektrodenplatine). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Darstellung der Rohwerte.	77
4.30	Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der CDC-Elektroden für die Schätzung der Eisdicke (die Elektroden befinden sich im mittleren Bereich der Elektrodenplatine). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Auf die Werte ist ein gleitender Mittelwertfilter angewendet.	78

Abbildungsverzeichnis

4.31	Messung mit unterschiedlich dicken Raureifschichten. Darstellung der Messwerte der IQ-Elektrode (die Elektrode befindet sich im oberen Bereich der Elektrodenplatine). (a) trocken, (b) bis (f) dicker werdende Raureifschichten. Darstellung der Rohwerte. Kapazitätswerte werden am Anfang der Messung Offset befreit (Anfangswert ~ 30 pF).	79
5.1	Blockdiagramm mit gekennzeichneten Strom-Messpunkten. . .	81
5.2	Messung des Stromverbrauchs des Gesamtsystems an Strom-Messpunkt <i>I3</i> . Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Dies ergibt im aktiven Zeitraum eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 5,62$ mA für eine Dauer von 528,2 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit ± 1 V gewählt.	82
5.3	Messung des Stromverbrauchs des IQ an Strom-Messpunkt <i>I5</i> . Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 14,5$ mA für eine Dauer von 146,3 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit ± 200 mV gewählt. .	82
5.4	Messung des Stromverbrauchs des CDC an Strom-Messpunkt <i>I6</i> . Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von $\sim 650\ \mu\text{A}$ für eine Dauer von 62,94 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit ± 20 mV gewählt. .	83
5.5	Messung des Stromverbrauchs des Mikrocontrollers bei der Funkkommunikation an Strom-Messpunkt <i>I4</i> . Darstellung des Spannungsverlaufes am Messwiderstand ($10\ \Omega$). Im markierten Bereich ergibt sich eine durchschnittliche Stromaufnahme von ~ 16 mA für eine Dauer von 23,46 ms. Spannungsbereich des Oszilloskops ist mit ± 500 mV gewählt.	83
5.6	Hochrechnung des Stromverbrauches und der Akkulebensdauer bei verschiedenen Abtastraten. Die Akkukapazität beträgt 2600 mAh.	85
5.7	Messaufbau auf der Dachterrasse der Technischen Universität Graz.	87
5.8	(links) Foto vom Beginn der Messung bei leichter Bewölkung. (rechts) Foto vom Ende der Messung bei starker Bewölkung. .	87

Abbildungsverzeichnis

5.9	(oben) Messung der Solarzellenspannung am Punkt I1. (unten) Messung des Li-Ionen Stromes an Strom-Messpunkt I2, dabei fließen positive Ströme in den Li-Ionen Akku. Über die gesamte Dauer ergibt sich ein durchschnittlicher Ladestrom von $\sim 14,16$ mA. Im markierten Bereich ergibt sich bei starker Bewölkung ein durchschnittlicher Ladestrom von $\sim 4,69$ mA.	88
5.10	Darstellung der verwendeten Geräte. Oben ist das GPS, links unten der Sensor und rechts unten die Basisstation – betrieben mithilfe eines Akkus – zu sehen.	90
5.11	Reichweitentest bei 180 m Distanz zwischen Sensor und Basisstation. Keine Kommunikationsprobleme in allen Ausrichtungen des Sensors und der Basisstation.	91
5.12	Reichweitentest bei 1430 m Distanz zwischen Sensor und Basisstation. Teilweise Kommunikationsausfälle bei gewissen Ausrichtungen des Sensors und der Basisstation.	91

Anhang

Verwendete Programme

Auflistung der im Laufe dieser Arbeit verwendeten Programme (nicht - vollständig):

- Versionskontrolle: Git
- Schaltplan und Layout-Software: Eagle
- Programmierumgebung: Code Composer Studio
- Datenlogger am PC: YAT - Yet Another Terminal
- Weiterverarbeitung: Matlab
- Oszilloskop-Software: Picoscope
- Dokumentation: Latex, Miktex, TexnicCenter, Kile (die Dokumentenvorlage dieser Arbeit stammt von <http://latex.tugraz.at/vorlagen/allgemein> (übernommen am 16.05.2017) und die Formatierung der Danksagung von Dipl.-Ing. Michael Grubmüller BSc)
- Die zweite Version des Programms zur Datenaufbereitung (Textdatei zu Matlab) stammt von Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer und ist in C geschrieben

Mögliche Erweiterungen

Im Folgenden werden zukünftige mögliche Erweiterungen aufgelistet:

- Temperaturmessung mithilfe des CDC und einem Transistor statt dem PT1000.
- Li-Ionen Spannungsmessung einschaltbar mithilfe eines PMOS und NMOS realisieren.

- Schutzschaltung des Li-Ionen Akkus weglassen (benötigt alleine $\sim 3 \mu\text{A}$).
- Messschaltungen erweitern, um den Ausgangsstrom zu den Elektroden messen zu können.
- Je nach benötigtem Messbereich beim IQ den externen Takt und die Operationsverstärker weglassen.
- Startvorgang bzw. Kontrolle der Harvester-Ausgangsspannung verbessern.
- Sensor-Controller im Mikrocontroller verwenden, um Stromverbrauch weiter zu reduzieren.
- Eine mögliche Messfrequenzvariation beim Kapazitäts-Messverfahren könnte das Impedanz-Messverfahren obsolet machen bzw. einen zusätzlichen Informationsgewinn bringen.
- Dynamischen Messablauf verwenden, um bei wärmeren Temperaturen auf Messungen verzichten zu können (weitere Stromeinsparungen).