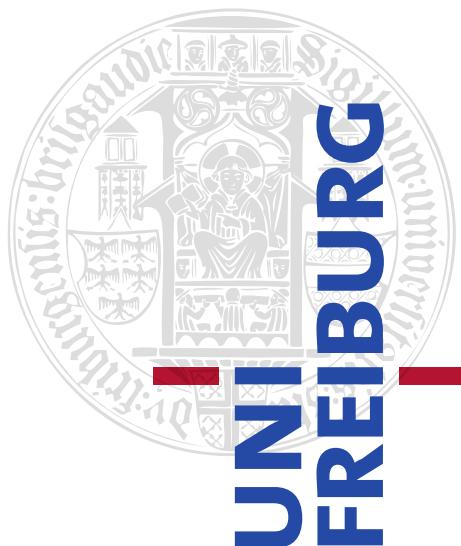


**Bachelorarbeit**

**Entwurf und Charakterisierung eines  
kapazitiven Sensors zur Detektion von  
Eisschichten**

Kevin Rafael Mader

28.10.2021



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau  
Technische Fakultät  
Institut für Elektrische Messtechnik und Eingebettete Systeme



**Bearbeitungszeitraum:**

28.07.2021 – 28.10.2021

**Gutachter:**

Prof. Dr. Stefan J. Rupitsch

**Betreuer:**

Thomas Schaechtle, M.Sc.



## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbstständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



## Kurzfassung

In Deutschland spielt Windenergie die größte Rolle beim Ausbau erneuerbarer Energie im Stromnetz. Durch die Verringerung von Standzeiten und die Optimierung der Effizienz von Windkraftanlagen kann die Ökobilanz selbiger gesteigert und die Energiewende beschleunigt werden. Eisbildung auf Windkraftanlagen führt zu Ertragseinbußen von bis zu 50 % und zählt somit zu den wichtigsten Problemfaktoren, die es zu optimieren gilt.

Ziel dieser Arbeit ist festzustellen, ob ein kapazitiver Sensor geeignet ist Eisbildung auf Windkraftanlagen zu erkennen und zu quantifizieren. Zu diesem Zweck wurde ein Sensor entworfen und dessen Verhalten auf verschiedene Eisschichtdicken, Temperatur und Feuchtigkeit analysiert.

Die Messungen haben gezeigt, dass ein koplanares Sensordesign für die Quantifizierung von Eisschichtdicken geeignet ist, jedoch Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf den Sensor eine Verfälschung der Messung verursachen können.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretischer Hintergrund .....</b>	<b>2</b>
2.1 Kapazitive Sensoren .....	2
2.1.1 Plattenkondensator .....	2
2.1.2 Koplanare Kondensatoren .....	3
2.2 Materialerkennung über Permittivitätszahl.....	3
2.3 Kapazitive Erkennung von Füllständen .....	4
2.4 Kapazitätssmessmethoden.....	5
2.4.1 Elektrische Tore.....	6
2.4.2 Schwingkreise.....	7
2.4.3 Sprungantwort .....	7
2.5 Oberflächenenergie .....	8
2.6 Arten und Entstehungswege von Eis .....	9
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>10</b>
3.1 Anwendungen von Eis- und Wasserdetektion .....	10
3.2 Vermeidung der Eisbildung auf Windkraftanlagen .....	11
3.3 Verhalten bei vereisten Rotorblättern .....	12
3.4 Einordnung der Arbeit .....	12
<b>4 Sensorentwicklung .....</b>	<b>13</b>
4.1 Auswahl der Messmittel .....	13
4.2 Simulation .....	14
4.3 Sensorentwurf .....	17
4.4 Messaufbau .....	18
4.5 Messdurchführung .....	21
4.5.1 Vorbereitung einer Messreihe .....	21
4.5.2 Durchführung von Messzyklen einer Messreihe .....	23
4.5.3 Aufzeichnung der Messwerte .....	24
<b>5 Messergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>25</b>
5.1 Sensorverhalten bei wachsenden Eisschichten .....	25
5.2 Frequenzverhalten des Sensors .....	26
5.3 Charakterisierung des Temperaturverhaltens .....	27
5.4 Störeinflüsse ungeschirmter Messleitungen .....	30

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Aussicht .....</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>39</b>
10.1	Simulationsergebnisse: Kapazität über Elektrodenbreite .....	39
10.2	Simulationsergebnisse: Kapazität über Elektrodenabstand .....	41
10.3	Messergebnisse: Kapazität über Eisdicke für schmale Elektroden.....	43
10.4	Messergebnisse: Kapazität über Eisdicke für breite Elektroden.....	48

## 1 Einleitung und Motivation

Erneuerbare Energien steigen immer mehr in der Wichtigkeit bei der aktuell laufenden Wandlung auf CO<sub>2</sub>-neutrale Stromerzeugung, um den Klimawandel nicht weiter durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe zu befeuern.

Um die Stromerzeugung möglichst umweltfreundlich zu gestalten ist es wichtig, die nutzbaren Einsatzbereiche der CO<sub>2</sub>-neutralen Energiegewinnung zu vergrößern und während der Lebensdauer von Anlagen wie Windkraft- oder Solaranlagen die größtmögliche Menge an Energie abzunehmen und diese sinnvoll zu nutzen. Neben der Speicherung der elektrischen Energie zu Zeiten geringer Energieabnahme am Stromnetz bedarf es auch der Optimierung der Effizienz der Anlagen unter schlechten Witterungsbedingungen.

Für Windkraftanlagen stellt die Vereisung der Rotorblätter eine sehr große technische Herausforderung bei der Wahl der Standorte sowie beim Betrieb dar. An Rotorblättern angefrorenes Eis beeinflusst die Aerodynamik selber und stellt im Betrieb aufgrund der Zentrifugalkraft eine signifikante mechanische Last für die Windkraftanlage dar, die zu erhöhtem Stress der Komponenten und somit zu einer verkürzten Lebensdauer der Anlage führen kann. Abgeworfenes oder abgefallenes Eis wiederum stellt abhängig von der Größe der Eisstücke eine Gefahr für Mensch, Tier und Strukturen im Umfeld der Windkraftanlage dar.

Diese Arbeit umfasst den Entwurf und die Charakterisierung eines Sensors, der zur quantifizierten Eiserkennung eingesetzt werden kann, um bei Bedarf eine Entfernung des Eises einzuleiten oder andere Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

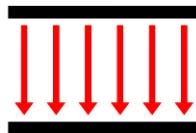
## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Kapazitive Sensoren

Kapazitive Sensoren sind aufgrund ihrer einfachen Konstruktion und verschiedener Messmethoden Basis vielseitig einsetzbar und Grundlage vieler Messverfahren.

#### 2.1.1 Plattenkondensator

Zwischen zwei Platten verschiedener Ladung entsteht ein elektrisches Feld. Direkt zwischen den Platten ergeben sich geradlinige elektrische Feldlinien, sowie gebogene Feldlinien außerhalb der Flächen, die man als Streufeld bezeichnet. Für Plattenkondensatoren werden die Streufelder zumeist vernachlässigt, da diese keinen signifikanten Beitrag zur Gesamtkapazität liefern.



**Abbildung 1:** Kapazität zwischen zwei parallel angeordneten Platten im Querschnitt.

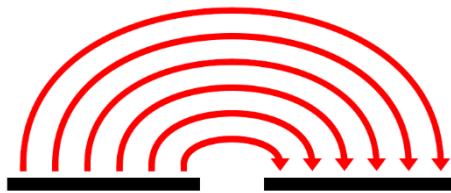
Unter der idealisierten Annahme, dass alle elektrischen Feldlinien zwischen zwei Platten geradlinig sind, ergibt sich die Kapazität aus der Breite  $b$  sowie der Tiefe  $t$  der Platten, dem Abstand  $d$  zwischen den Platten, der relativen Permittivität  $\varepsilon_r$  des Mediums zwischen den Platten sowie der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$  nach [1] durch die Gleichung

$$C = \frac{b \cdot t}{d} \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0. \quad (1)$$

Eine Kapazitätsänderung ist erreichbar durch Veränderung der Plattenflächen  $b \cdot t$ , der Distanz oder der relativen Permittivität zwischen den Platten oder einer Kombination dieser Änderungen.

### 2.1.2 Koplanare Kondensatoren

Werden Kondensatorplatten nicht übereinander, sondern koplanar platziert, so wird die Fläche zwischen den Kondensatorplatten sehr gering, wodurch der Einfluss von Streufeldern signifikant steigt.



**Abbildung 2:** Elektrisches Feld zwischen zwei, in einer Ebene angeordneten Platten.

Jede Leiterbahn einer Platine stellt einen Kondensator nach diesem Schema dar.

## 2.2 Materialerkennung über Permittivitätszahl

Wird das Material zwischen den Platten eines Kondensators durch ein anderes Material ersetzt, verändert sich die Kapazität des Kondensators entsprechend der Veränderung der relativen Permittivität, auch Permittivitätszahl genannt, der Materialien. In Tabelle 1 sind typische Permittivitätszahlen für einige, in dieser Arbeit relevanten, Materialien aufgelistet.

**Tabelle 1:** Relative Permittivität verschiedener Materialien [2].

Material	Relative Permittivität $\epsilon_r$
Vakuum	1,0
Luft	1,000576 (0 °C, 105 Pa) 1,05404 (0 °C, 107 Pa)
Wasser [3]	87,9 (0 °C) 80,2 (20 °C)
Eis	16 (- 20 °C)
FR-4 [4]	3,2 ... 4,7

Wird Material innerhalb des elektrischen Feldes eines Kondensators nur partiell durch anderes Material ersetzt gilt dieser Effekt ebenfalls, jedoch ist hierbei neben der relativen Permittivität auch die Stärke des elektrischen Feldes an Stelle der Ersetzung relevant.

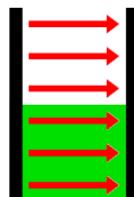
## 2.3 Kapazitive Erkennung von Füllständen

Die Erkennung von Eis und Wasser ist wie die Erkennung von Füllständen eine gängige technische Herausforderung. Nachfolgend werden kapazitive Füllstandssensoren mit Flüssigkeiten beschrieben, wobei die beschriebenen Eigenschaften mit Eis oder Schnee isomorph gelten.

Vertikal aufgestellte Platten in einer Flüssigkeit, wie in Abbildung 3 dargestellt, stellen einen Plattenkondensator dar, der in eine Parallelschaltung zweier Kondensatoren unterteilt werden kann. Die Kapazität des Sensors variiert linear mit der Höhe  $h_{fl}$  der Flüssigkeit  $fl$  in Abhängigkeit der Tiefe  $l$  und Gesamthöhe  $h$  der Sensorplatten nach Gleichung (1) durch die Unterschiedlichen Permittivitätszahlen  $\varepsilon_r$  über

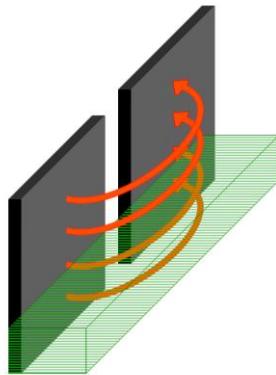
$$\begin{aligned} C_{\text{Sensor}} &= C_{\text{Luft}} + C_{\text{Flüssigkeit}} \\ &= \frac{l \cdot (h - h_{fl})}{d} \cdot \varepsilon_{r,\text{luft}} \cdot \varepsilon_0 + \frac{l \cdot h_{fl}}{d} \cdot \varepsilon_{r,fl} \cdot \varepsilon_0 \\ &= \frac{l \cdot \varepsilon_0}{d} \cdot ((h - h_{fl}) \cdot \varepsilon_{r,\text{luft}} + h_{fl} \cdot \varepsilon_{r,fl}). \end{aligned}$$

Der messbare Füllstand ist hierbei durch die Höhe der Sensorflächen begrenzt und somit variabel anpassbar auf die Anwendungen. Technisch ist hier jedoch das Problem gegeben, dass zwei Elektroden montiert werden müssen was in der Regel den Aufwand der Implementierung oder Montage vergrößert.



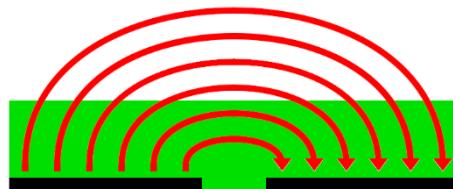
**Abbildung 3:** Parallele Platten eines Plattenkondensators als Füllstandsmesser im Querschnitt.

Auch vertikal aufgebaute, koplanare Kapazitäten wie in Abbildung 4 dargestellt liefern Kapazitätswerte, die in linearer Abhängigkeit zum Füllstand stehen [5]. Diese Platten können auf einem gemeinsamen Träger montiert werden, wodurch die Produktion vereinfacht wird. Diese Sensoren detektieren die Füllstandsänderung über das Streufelds. Wie bei parallelen Platten ist die Höhe dieser Sensoren flexibel und somit der physikalische Messbereich.



**Abbildung 4:** Vertikal verbauter, koplanarer Kondensator zur Füllstandsermittlung.

Koplanar aufgebaute Kapazitätsmesser können auch horizontal verbaut werden wie in Abbildung 5 dargestellt. Da die Stärke des elektrischen Feldes mit zunehmendem Abstand vom Sensor abnimmt, verringert sich auch die Empfindlichkeit des Sensors mit steigendem Füllstand. Diese Methode ist daher nur für geringe Füllstandshöhen geeignet.



**Abbildung 5:** Horizontal platzierte, koplanarer Kondensator zur Detektion von Füllständen im Querschnitt.

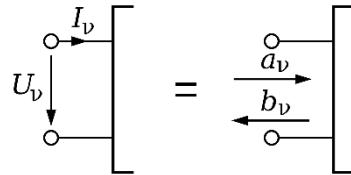
Für die Anwendung an Windkraftanlagen ist eine horizontale Platzierung wünschenswert, um den Einfluss auf die Aerodynamik möglichst gering zu halten und eine sichere Montage zu erlauben.

## 2.4 Kapazitätsmessmethoden

Abhängig von der Komplexität des Systems, der benötigten Flexibilität und Genauigkeit gibt es verschiedene Messmethoden zur Ermittlung von Kapazitäten.

### 2.4.1 Elektrische Tore

Elektrische Tore können über ihre Admittanz, Impedanz oder die Streuparameter charakterisiert werden. Abbildung 6 zeigt ein einzelnes Tor  $v$  eines Netzwerks.



**Abbildung 6:** Elektrisches Tor mit Klemmenspannung  $U_v$  und Klemmenstrom  $I_v$  für Impedanz- und Admittanzbe trachtung (links), Tor mit eingehen eingehenden Welle  $a_{v_2}$  und Reflexion  $b_{v_1}$  für Betrachtung der Streuparameter (rechts) [6].

Während die Impedanz und Admittanz auf die Klemmenspannung  $U_v$  und den Klemmenstrom  $I_v$  bezogen sind, stellen Streuparameter die Reflexion  $b_{v_1}$  einer eingehenden Welle  $a_{v_2}$  für alle Tore in Form einer komplexen Zahl dar. Der Zusammenhang dieser Wellen kann für mehrere Eingänge als Matrix komplexer Zahlen nach

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1v} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{v1} & \cdots & s_{vv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_v \end{pmatrix} \quad (2)$$

beschrieben werden. Die Größe der Vektoren entspricht der Anzahl der Tore und die Anzahl der Streuparameter ist somit quadratisch Abhängig von der Anzahl der Tore. Vom Streuparameter ist eine Umwandlung in die Impedanz mittels der Bezugsimpedanz  $Z_0$  und der Einheitsmatrix  $E$  über die Formel

$$Z = Z_0 \cdot (E - S)^{-1} \cdot (E + S) \quad (3)$$

möglich. Ebenso ist die Bestimmung der Admittanz möglich über

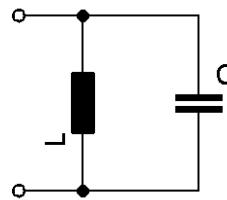
$$Y = \frac{1}{Z_0} \cdot (E + S)^{-1} \cdot (E - S). \quad (4)$$

Auch eine Rückwandlung aus Impedanz oder Admittanz in Streuparameter ist entsprechend möglich. Die Bezugsimpedanz ist für typische Netzwerkanalysatoren üblicherweise  $Z_0 = 50 \Omega$ . Die Umrechnung aus der Impedanz erlaubt das einfache Bestimmen der Kapazität zwischen zwei Anschlüssen

$$C_{v_1 v_2} = \frac{1}{2\pi \cdot j \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot |Im(Z_{v_1 v_2})|}. \quad (5)$$

### 2.4.2 Schwingkreise

Wird ein Kondensator parallel zu einer Spule geschaltet entsteht ein Parallelschwingkreis wie in Abbildung 7 dargestellt. Wird dieser mit einem Impuls zum Schwingen angeregt, so schwingt die Schaltung in ihrer Resonanzfrequenz.



**Abbildung 7:** LC-Parallelschwingkreis zur Bestimmung einer unbekannten Kapazität anhand der Resonanzfrequenz. Die Resonanzfrequenz  $f_0$  des Schwingkreises ist abhängig von der Induktivität der Spule  $L$  sowie der Kapazität des Kondensators  $C$  gemäß

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \quad (6)$$

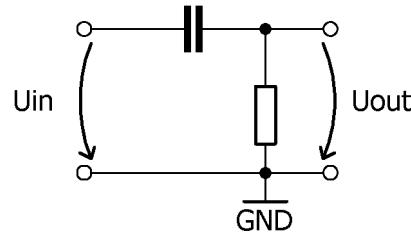
Wird ein bekanntes  $L$  gewählt, kann somit die Kapazität  $C$  durch umstellen von Gleichung (6) anhand einer gemessenen Resonanzfrequenz nach

$$C = \frac{1}{(2\pi \cdot f_0)^2 \cdot L} \quad (7)$$

errechnet werden.

### 2.4.3 Sprungantwort

Eine günstige und einfache Lösung zur Kapazitätsbestimmung stellt die Sprungantwort einer RC-Schaltung dar. Hierzu wird der Kondensator  $C$  in Reihe zu einem Widerstand  $R$  nach Abbildung 8 verschaltet und mit einer Rechteckspannung angesteuert.



**Abbildung 8:** RC-Ladeschaltung zur Ermittlung einer unbekannten Kapazität über die Sprungantwort.

Anhand des Spannungsverlaufs am Widerstand kann die Ladegeschwindigkeit und somit die Kapazität ermittelt werden. Die Spannung am Widerstand  $U_{out}$  ergibt sich nach

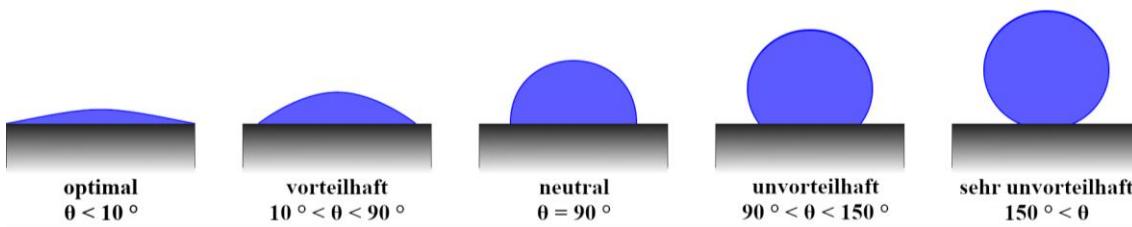
$$U_{out} = U_{in} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

und ermöglicht so über die Zeitkonstante  $\tau$  die Bestimmung der Kapazität mit

$$C = \frac{\tau}{R}. \quad (9)$$

## 2.5 Oberflächenenergie

Soll mit einem planaren Sensor die Benetzung einer Oberfläche gemessen werden ist es wichtig, dass der Sensor die gleichen Benetzungseigenschaften wie die Oberfläche aufweist. Die Oberflächenenergie eines Materials bestimmt, wie gut sich eine Oberfläche mit einer Flüssigkeit benetzen lässt. Abbildung 9 zeigt verschiedene Grade der Benetzung einer Oberfläche und deren Klassifizierung über den entstehenden Benetzungswinkel zwischen Oberfläche und Flüssigkeit.



**Abbildung 9:** Grade der Benetzbarkeit einer Oberfläche in Abhängigkeit der Benetzungswinkel, Nachzeichnung nach [7].

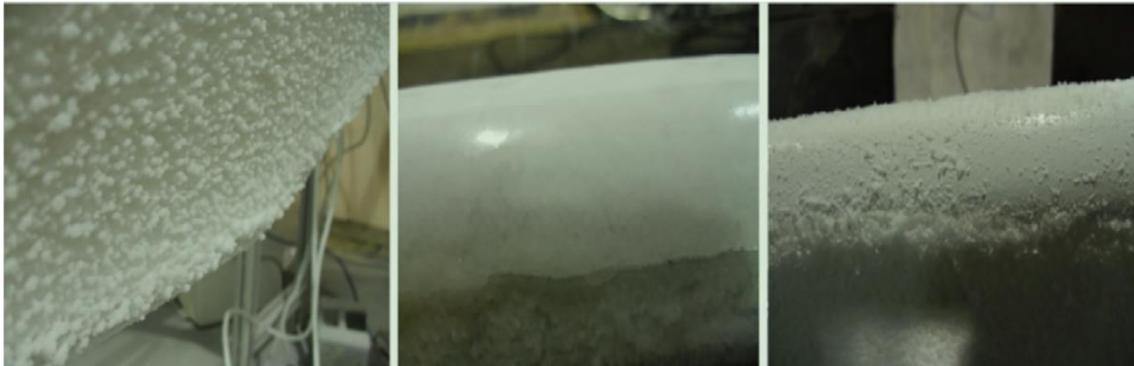
Der Benetzungswinkel  $\theta$  ist abhängig von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit  $\sigma_L$ , der Oberflächenenergie des Körpers  $\sigma_B$  sowie der Grenzflächenenergie zwischen den beiden Komponenten  $\sigma_{LB}$ . Der Winkel errechnet sich über die Formel

$$\cos \theta = \frac{\sigma_B - \sigma_{LB}}{\sigma_L} \quad (10)$$

Oberflächen, welche eine Benetzung vermeiden sollen, weisen eine geringe Oberflächenenergie auf, beispielsweise Antihaftbeschichtungen von Pfannen. Soll die Benetzung mit einem Sensor bestimmt werden ist es essenziell, dass die Oberflächenenergie des Sensors der zu messenden Energie entspricht, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

## 2.6 Arten und Entstehungswwege von Eis

Eis auf Windkraftanlagen wird in die drei Kategorien „harter Frost“, „Glasierung“ und „weicher Frost“ eingeteilt, wie in Abbildung 10 dargestellt.



**Abbildung 10:** Zwei typische Arten von auftretendem Eis auf Windkraftanlagen. Harter Frost (links), Glasierung, Weicher Frost (rechts) [8].

Weicher Frost entsteht für gewöhnlich bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C und einer geringen Menge von Wassertröpfchen mit kleinem Durchmesser in der Luft und zeichnet sich durch eine feine Kristallstruktur aus. Diese Eisstruktur ähnelt Schnee und ist einfach zu entfernen. Enthält die Luft einen großen Anteil von Wassertröpfchen mit einem großen Durchmesser bei 0 °C, so gefrieren diese mit einer größeren Kontaktfläche an die Rotoren und führen zu hartem Frost, welcher schwer zu entfernen ist. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auftretender Regen gefriert nach Kontakt mit dem Rotorblatt zu einer homogenen Eisschicht die als „Glasierung“ bezeichnet wird. Diese Art der Vereisung ist zugleich die schwerste zu entfernen [8].

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Anwendungen von Eis- und Wasserdetektion

In Kraftfahrzeugen werden seit einigen Jahren automatische Scheibenwischersteuerungen mittels kapazitiven und optischen Wasserdetektoren verbaut [9]. Diese Sensoren liefern in der Regel nur Signale die die Existenz von Wasser im Messbereich darstellen, jedoch keine Quantifizierung der Wassermenge erlauben. Die Zeit zwischen einem Wischvorgang und der Detektion von neuem Wasser auf der Windschutzscheibe reicht für die Steuerung, um grob die Stärke des Regens zu bestimmen und die Geschwindigkeit der Scheibenwischer zu steuern.

Bei Flugzeugen kann eine Vereisung dazu führen, dass die Beweglichkeit von Klappen eingeschränkt wird, wodurch das Rollen, Gieren oder Nicken des Flugzeugs verhindert wird, was bis zum Absturz des Flugzeugs führen kann. Früherkennung von Eisbildung ermöglicht das Starten von Enteisungsvorgängen oder in Extremfällen das Einleiten von Notlandungen.

Für Windkraftanlagen existieren bereits Sensoren zur Ermittlung der Vereisung, wie der eologix CET214. Dieser Sensor reduziert jedoch die internen analogen Messwerte auf weniger Ausgabewerte gemäß Tabelle 2.

**Tabelle 2:** Ausgabewerte des eologix CET214 nach [10].

Ausgabewert	Bedeutung
4	Eis > ~10mm
3	Eis > ~1-2mm
2	Eis < 1mm oder feuchte Oberfläche
1	Freie Oberfläche

Diese grobe Auflösung ist für eine Zustandssteuerung ausreichend, wenn sie mit meteorologischen Daten aus der Gondel, dem Maschinenraum der Windkraftanlage, referenziert werden.

## 3.2 Vermeidung der Eisbildung auf Windkraftanlagen

Eine Vermeidung der Vereisung durch strategische Platzierung von Windkraftanlagen stellt die effizienteste Art dar. Hier empfehlen sich Regionen, in denen die Temperatur nicht unter den Gefrierpunkt fällt oder in denen sehr wenig Niederschlag fällt und geringe Luftfeuchtigkeit herrscht. Die International Energy Agency (IEA) definiert hier Regionen in drei Kategorien gemäß Tabelle 3. Hierbei ist zu beachten, dass manche Regionen durch die drei Eigenschaften in mehreren Eis-Klassen landen können. In einem solchen Fall ist die höchste Klasse für diese Region anzunehmen. Meteorologische Vereisung besteht, wenn das Aufwachsen von Eis, durch die Wetterbedingungen wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Feuchtigkeitsgehalt der Luft und freie Wassertropfen, möglich ist. Der ganze Zeitraum, über den Eis auf den Messgeräten oder anderen Strukturen existiert, wird mit „instrumenteller Vereisung“ bezeichnet.

**Tabelle 3:** Klassifizierung von Regionen anhand der jährlichen, prozentualen Energieverluste durch Vereisung [11].

IEA Eis-Klasse	Meteorologische Vereisung	Instrumentelle Vereisung	Verluste durch Vereisung
	% des Jahres	% des Jahres	% der jährlichen Produktion
5	> 10	> 10	> 20
4	5 – 10	10 – 30	10 – 25
3	3 – 5	6 – 15	3 – 12
2	0,5 – 3	1 – 9	0,5 – 5
1	< 0,5	< 1,5	< 0,5

Ist dies nicht möglich, so können Rotorblätter von Windkraftanlagen beheizt werden um eine Eisbildung zu vermeiden. Hierzu kann die Abwärme aus dem Generatorraum in der Gondel in die Flügel geleitet werden. Dieses Vorgehen ist Standard in der Avionik. Hierbei wird warme Abluft aus Flugzeugtriebwerken in die Flügel des Flugzeugs gelenkt, um selbigen über dem Gefrierpunkt zu halten und das Bilden von Eis zu vermeiden [12]. Da die Wärme bei Windkraftanlage primär durch Verluste beim Wandel der Bewegungsenergie des Rotors entsteht, während bei Triebwerken größtenteils durch den Verbrennungsvorgang von Kerosin entsteht, kann die Technik aufgrund der deutlich geringeren Abwärme nur begrenzt eingesetzt werden. Hinzu kommt, dass im Generatorraum keine Verlustwärme erzeugt werden kann, während die Rotoren stillstehen.

Unabhängig von der Betriebsdauer der Windkraftanlage ist eine aktive Beheizung der Flügel mit Heizelementen möglich. Diese Variante stellt jedoch die ineffizienteste Form der Vermeidung dar, da hierzu elektrische Energie in Wärme umgewandelt werden muss und somit keinen anderen Effekt erfüllt.

### **3.3 Verhalten bei vereisten Rotorblättern**

Werden Windkraftanlagen nicht gegen Eisbildung geschützt, müssen diese bei Erreichen einer kritischen Eisschichtdicke abgeschaltet werden. Vor Erreichen dieser Eisschichtdicke kann das Windrad zwar weiter betrieben werden, jedoch wird durch die verschlechterten aerodynamischen Eigenschaften der Windkraftanlage der Wirkungsgrad signifikant reduziert, sodass sich der Ertrag der Anlage um bis zu 50% reduziert [8].

In Regionen mit warmen Quellen wie beispielsweise Island ist es möglich vereiste Rotorblätter mit warmem Wasser aus den Quellen zu besprühen um Eis zu entfernen, jedoch handelt es sich hier um aktive Instandhaltung, die den Einsatz von Helikoptern und Arbeitskraft erfordert und somit weder technisch noch finanziell eine optimale Lösung für das Problem darstellt.

### **3.4 Einordnung der Arbeit**

Die Abschaltung von Windkraftanlagen könnte reduziert und die Effizienzsenkung durch Vereisung verringert werden, wenn die Funktion zur Enteisung von Rotorblättern in neu produzierten Windkraftanlagen verbaut und in bestehenden Anlagen in kalten Regionen nachgerüstet wird.

Der in dieser Arbeit entwickelte Sensor basiert auf koplanaren Elektroden zur Detektion von Eis und Wasser durch Änderung der relativen Permittivität im elektrischen Streufeld und damit einhergehender kapazitiven Variation.

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf und die Charakterisierung eines Sensors der zur quantifizierten Eisschichtmessung eingesetzt werden kann, um eine möglichst effiziente Enteisung zu ermöglichen.

## 4 Sensorentwicklung

Die Konzeptionierung und der Entwurf des Sensors unterteilen sich in die Evaluation möglicher Komponenten zur Anwendung des Sensors im Feld, der Simulation der Elektroden und dem Layout des Sensors mit Fertigung über einen Prototypenservice. Die Charakterisierung erfolgt in einem Teststand, der in einem vorherigen Projekt eigens für diesen Test entwickelt wurde.

### 4.1 Auswahl der Messmittel

Zur Analyse des Sensors im Labor stehen ein LCR-Meter LCR-821 der Firma GW Insteck sowie ein, von Professor Thomas Baier DG8SAQ entwickelter, Netzwerkanalysator VNWA3 zur Verfügung.

Um den Sensor auch praxisnah testen zu können, wurden mehrere Kapazitätsmesswandler verglichen. Die Auswahl ist in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4:** Verschiedene Kapazitätsmesswandler zur Integration auf dem Sensor.

---

Kapazitätsmesswandler	Kanäle	Messbereich in pF	Auflösung in bit	Leistungsaufnahme bei 3,3V in $\mu$ W	Einzelpreis ab 1kU in USD
AD7151 [13]	1	4	12	230	1,41
AD7150 [14]	2	4	12	330	1,41
AD7745 [15]	2	4	15,5	2310	4,80
FDC1004 [16]	4	15	16	2475	2,20
FDC2212 [17]	4	250.000	28	6930	2,97

Da das Verlegen von Leitungen durch die Rotoren einer Windkraftanlage einen irreversiblen und aufwändigen Eingriff darstellt, sollte der Sensor möglichst energieautark arbeiten können. Somit bietet sich Energy Harvesting an, was jedoch eine geringe Leistungsaufnahme der Elektronik voraussetzt. Für eine Umsetzung würde sich daher der AD7150 anbieten, da dieser beide Elektrodenpaare vermessen kann und mit 330  $\mu$ W die geringste Leistungsaufnahme aufweist. Aufgrund der Verfügbarkeit wurden jedoch in diesem Projekt für den Sensor je Elektrodenpaar je ein AD7151 eingesetzt.

Der AD7151 regt, wie in Abbildung 11 dargestellt, die zu vermessenden Kapazität mit einem Rechtecksignal an und vergleicht die Sprungantwort mit der einer

Referenzkapazität. Über einen Delta-Sigma Kapazität-Analog-Wandler CDC wird diese Differenz digitalisiert [18].

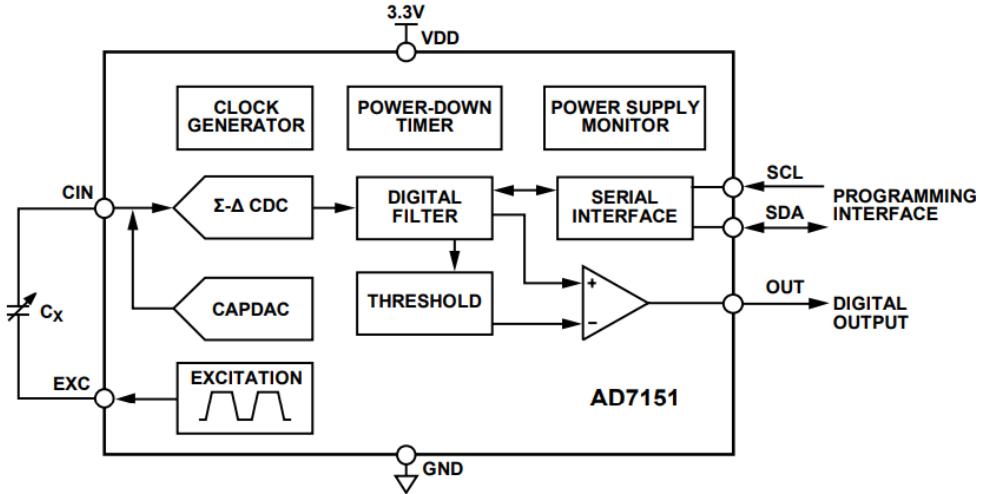
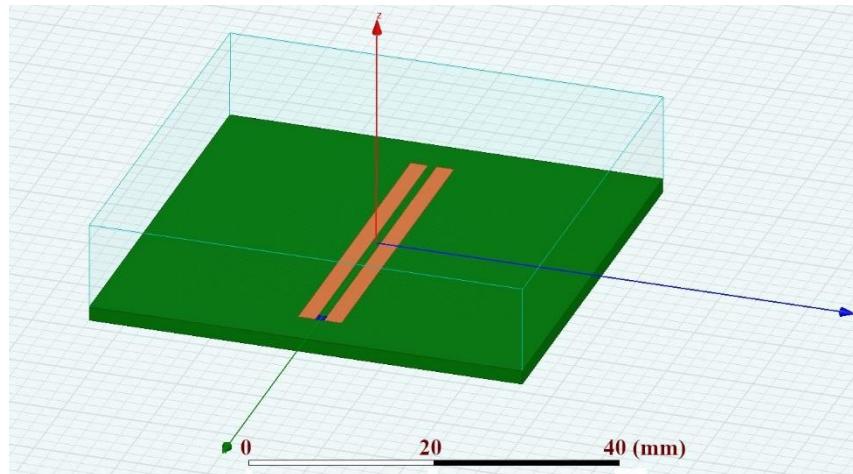


Abbildung 11: Blockschaltbild des eingesetzten Kapazitätsmesswandlers AD7151 [13].

Dieser IC erlaubt das Auslesen der Daten mittels I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), einem seriellen Bus mit einer Master-Slave Architektur. Dieser Bus wird, zum Teil unter der Bezeichnung TWI (Two-Wire-Interface), von einer Vielzahl an Mikrocontrollern unterstützt und ermöglicht somit eine einfache Integration.

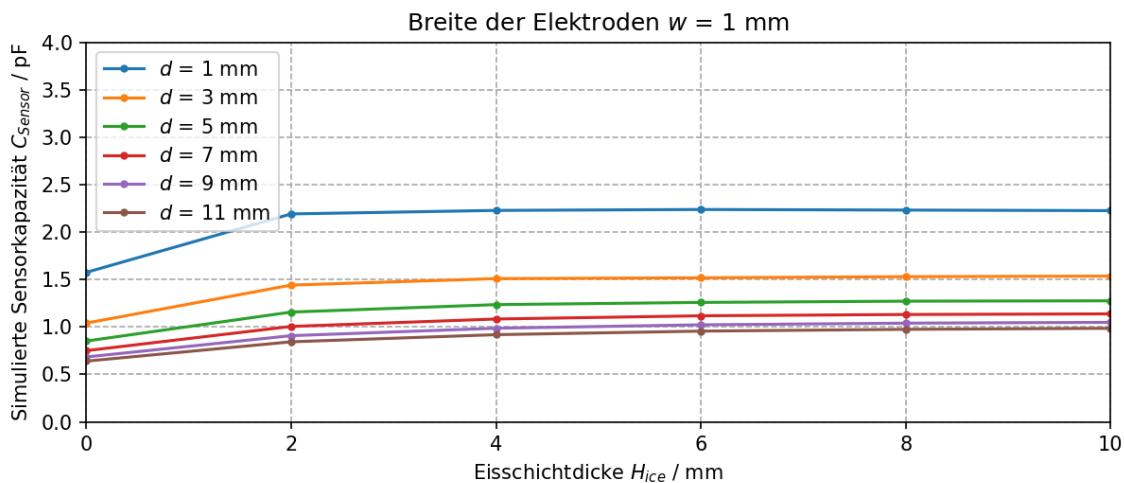
## 4.2 Simulation

Zum Entwurf eines Sensors wurde ein koplanares Sesordesign mit einer Finite-Elemente Methode simuliert. Die Simulation umfasst wie in Abbildung 12 dargestellt eine Grundplatte mit einer Permittivität von  $\epsilon_r = 4$ , wie sie für Glasfaser-basiertes Leiterplatten-Basismaterial (FR-4) typisch ist [4], mit einer Breite von  $w = 50$  mm,  $d = 50$  mm.



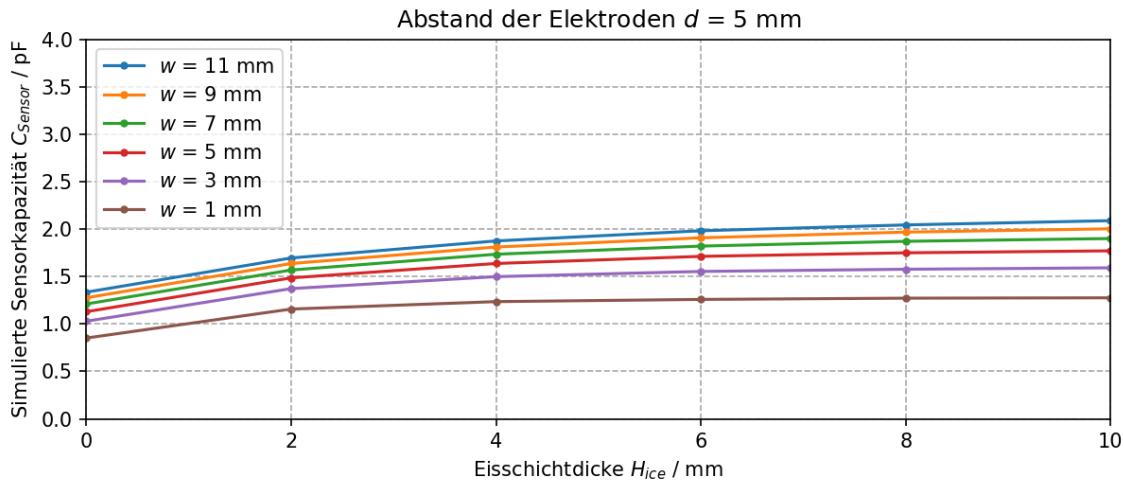
**Abbildung 12:** Simulationsmodell des Sensors auf einer 1,6 mm starken Grundplatte mit einer Breite von 50 mm und einer Tiefe von 50 mm. Die Elektroden sind 40 mm lang und wurden mit variierenden Breiten  $w$  und Abständen  $d$  simuliert.

Die Simulationen bei einer Elektrodenbreite  $w = 1 \text{ mm}$  zeigen entsprechend Abbildung 13, dass mit steigendem Abstand der Elektroden die Grundkapazität  $C_0$  ohne Eisschicht sinkt, ebenso wie die Empfindlichkeit für höhere Eisschichtdicken. Für höhere Leiterbahnabstände ist auch eine Vergrößerung des Messbereichs erkennbar.



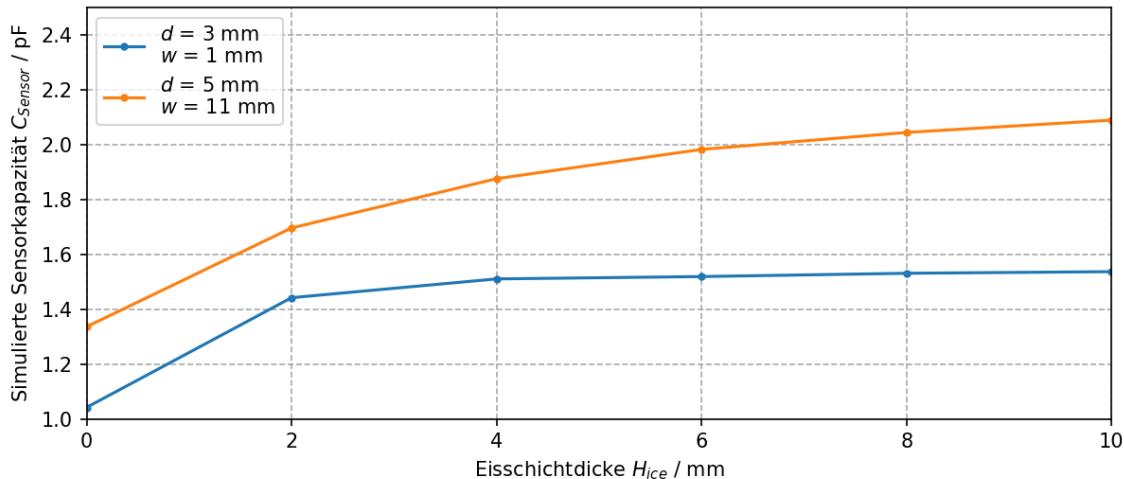
**Abbildung 13:** Simulierte Kapazitätswerte von Elektrodenpaaren mit Breite  $w$  und Elektrodenabstand  $d$  bei verschiedenen Eisschichtdicken.

Abbildung 14 zeigt, dass die Grundkapazität  $C_0$  über mit steigender Elektrodenbreite steigt. Mit steigender Elektrodenbreite verzögert sich die Sättigung des Sensors während die Empfindlichkeit nicht signifikant negativ beeinflusst wird.



**Abbildung 14:** Simulierte Kapazitäten von Elektrodenpaaren mit festem Elektrodenabstand  $d$  und verschiedenen Elektrodenbreiten  $w$  verschieden Eisschichtdicken.

Anhand der durchgeführten Simulationen von Sensoren mit Abständen von  $d, w \in \{1 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 9 \text{ mm}, 11 \text{ mm}\}$  wurden ein Ansatz mit zwei Elektroden zur Umsetzung gewählt. Die Elektroden wurden so gewählt, um den Sensor möglichst kompakt zu halten, während Eisdicken über den gesamten mittleren Messbereich des Kapazitätsmesswandlers AD7151 erkannt werden können. Die Festlegung auf die Hälfte des maximalen Messbereiches von 4 pF stellt einen Sicherheitspuffer dar. Durch diesen soll vermieden werden, dass durch produktionsbedingte Einflüsse wie Lötkontakt, abweichende Permittivität des Platinenbasismaterials oder die verwendete Schirmung der Prototyp für die Messungen mit dem gewählten IC durch Messbereichsüberschreitung unbrauchbar wird. Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Kapazität der gewählten Sensoren.

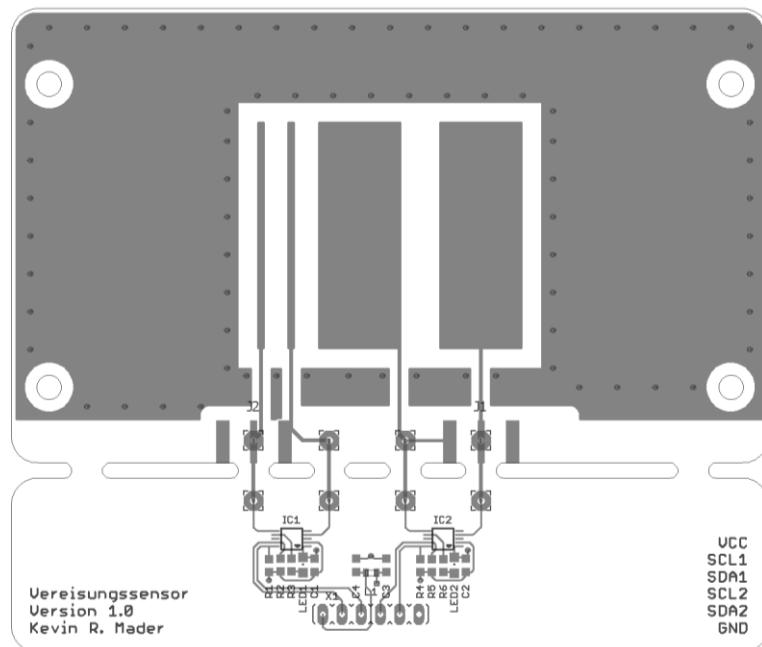


**Abbildung 15:** Simulierte Kapazität des Sensors über die Eisdicke mit Leiterbahnabstand  $d$  und Leiterbahnbreiten  $w$ .

Aus Abbildung 15 ist erkennbar, dass die Elektroden mit  $w = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 3 \text{ mm}$ , im Weiteren „schmale Elektroden“ genannt, eine signifikante Empfindlichkeit bei kleineren Eisschichten aufweisen aber bei größeren Eisschichten keine erkennbaren Veränderungen mehr aufweisen. Elektroden mit  $w = 11 \text{ mm}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ , nachfolgend „breite Elektroden“ genannt, zeigen in den unteren Bereichen eine nahezu gleiche Empfindlichkeit, liefern jedoch auch bei größeren Eisschichtdicken messbare Veränderungen. Beide Sensoren wurden gewählt um geringe Eisschichten zuverlässig vermessen zu können aber auch Eisschichten über  $H_{ice} = 2 \text{ mm}$  quantifizieren zu können.

### 4.3 Sensorentwurf

Die Oberseite des finalen Sensor-Layouts ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Sensoren wurden als zweilagige Platine entworfen und über einen Prototypenservice auf 1.6 mm starkem FR-4 gefertigt. Um den Sensor möglichst unabhängig von Umgebungsbedingungen und EMV-unempfindlicher zu machen, sind die Elektroden umgeben von Masseflächen. Hierdurch soll auch vermieden werden, dass die Oberfläche, auf welcher der Sensor montiert ist, einen störenden Einfluss auf die Messung haben kann.



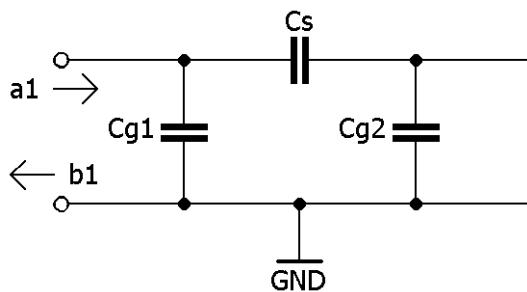
**Abbildung 16:** Oberseite des finalen Layouts des kapazitiven Vereisungssensors

Die beiden Elektrodenpaare können über UFL-Buchsen (WE 60312202114512) oder einen THT-SMA-Stecker kontaktiert werden. Um die Sensoren auch anwendungsnahe zu testen, wurden die Kapazitätssensoren AD7151 von Analog Devices auf dem Layout

als  $IC1$  und  $IC2$  vorgesehen. Wichtig bei der Ansteuerung ist jedoch, dass zu jedem Zeitpunkt lediglich einer der Chips eine Messung durchführen darf, da es sonst zu einer gegenseitigen Anregung der jeweils anderen Elektrode und somit zu Störungen kommt.

Für eine Anwendung in der Praxis wäre auch der Einsatz eines Mikrocontrollers denkbar, welcher eine Kapazitätsmesseinheit beinhaltet und die Messwerte direkt über ein Funkprotokoll mit der Steuerung für die Heizelemente kommuniziert.

Im Rahmen dieses Aufbaus wurden die Sensoren als Eintore nach Abbildung 17 vermesssen, da der verwendete Netzwerkanalyzer nur  $S_{11}$  und  $S_{21}$  Parameter aufzeichnen kann.



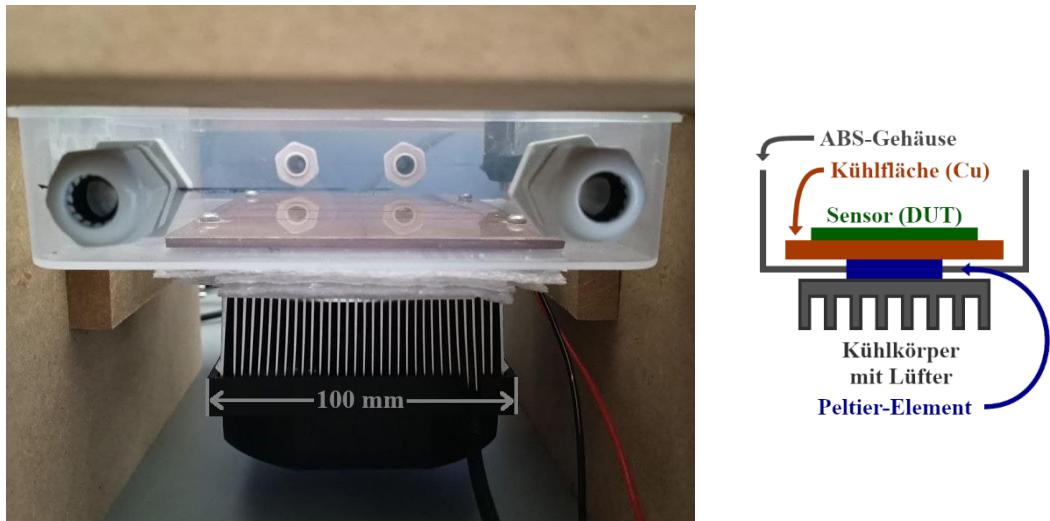
**Abbildung 17:** Vereinfachte Darstellung des Sensors als Eintor ohne parasitäre Widerstände.

Die gemessene Kapazität ergibt sich somit aus der Parallelschaltung, also der Summe der Sensor-Kapazität  $C_s$  und der Kapazität  $C_{g1}$  der angeregten Elektrode gegen Masse, was in der Betrachtung der Messergebnisse zu berücksichtigen gilt.

#### 4.4 Messaufbau

Zur Charakterisierung des Sensors wurde zum Aufbringen von Eis und zur Rasterung der Oberfläche ein entsprechender Teststand in einer Vorarbeit entwickelt und in dieser Arbeit zum Teil erweitert.

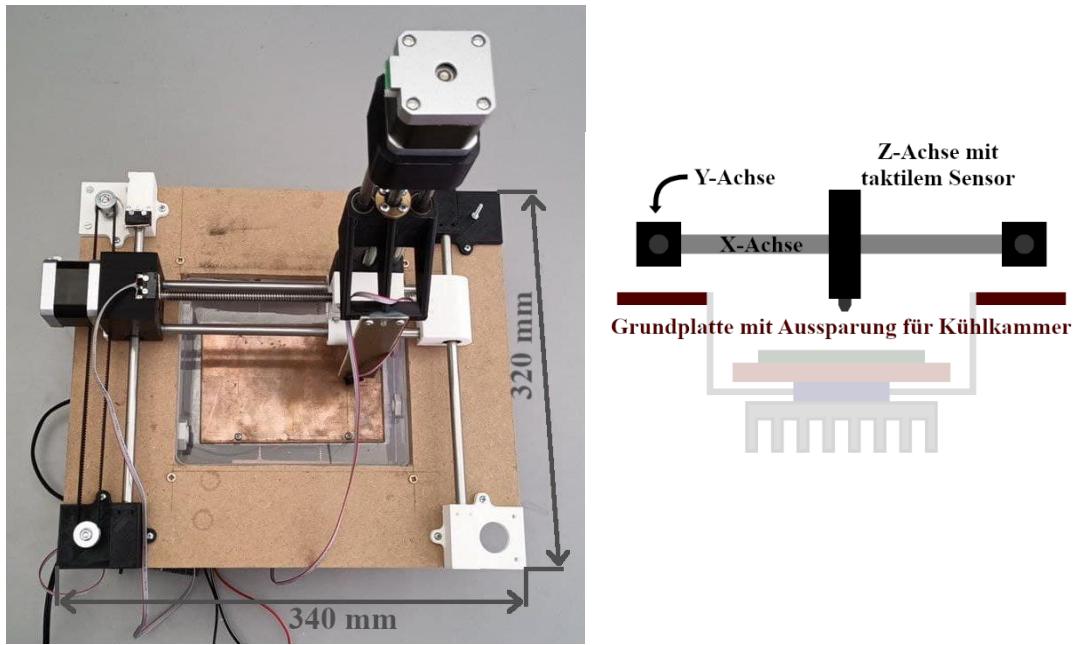
Die Basis des Messaufbaus bildet eine Kühlkammer aus ABS-Kunststoff mit einer zentral montierten, aktiv gekühlten Kupferplatte mit einer Stärke von 2 mm. Die Kühlung erfolgt durch ein TEC1-12706 Peltierelement, welches die Abwärme an einen Kühlkörper mit aktiver Belüftung abgibt. Abbildung 18 zeigt eine Seitenansicht dieser Kühlkammer sowie den schematischen Aufbau.



**Abbildung 18:** Kühlkammer des Messaufbaus in Seitenansicht mit schematischem Aufbau.

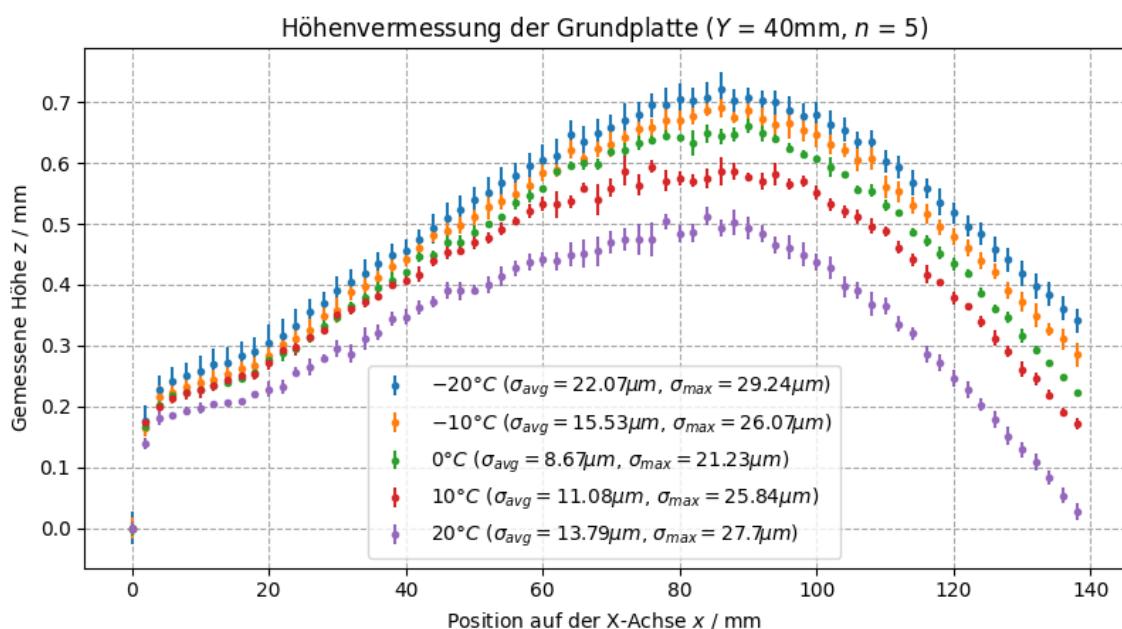
Die Kabelverschraubungen ermöglichen das Einführen von Leitungen oder Schläuchen in die Kühlkammer bei möglichst geringem Luftaustausch mit der Umgebungsluft. Bei geschlossener Kühlkammer wird somit eine Kühlung der Kammer von bis zu -30°C unter der Umgebungstemperatur ermöglicht.

Die zu vermessende Komponente (DUT) kann mittels eines Klebebandes, einer Wärmeleitpaste oder direkt durch anfrieren auf dem Kupferträger befestigt werden. Höhenprofile werden über eine taktile Abtastung erfasst. Hierzu wird die Kühlkammer in die entsprechende Konstruktion eingehängt und mit zwei Holzträgern verspannt. Die Höhenabtastung kann durch schrittmotorgetriebene Achsen, wie in Abbildung 19 dargestellt, über eine Fläche von 140 mm auf 100 mm erfolgen.



**Abbildung 19:** XYZ-Antrieb zur taktilen Abtastung einer Oberfläche mit eingespannter Kühlkammer.

Eine Vermessung der Grundplatte über die X-Achse zeigt, dass die Höhenmessungen bei gleichbleibender Umgebungstemperatur eine durchschnittliche Standardabweichung von  $\sigma_{avg} = 22,07 \mu\text{m}$  für jeden Messpunkt erreicht. Ebenso erkennbar ist eine Abhängigkeit über die Temperatur des Aufbaus, die auf unterschiedliche Längenkontraktionen und -expansionen der eingesetzten Materialien zurückzuführen ist.

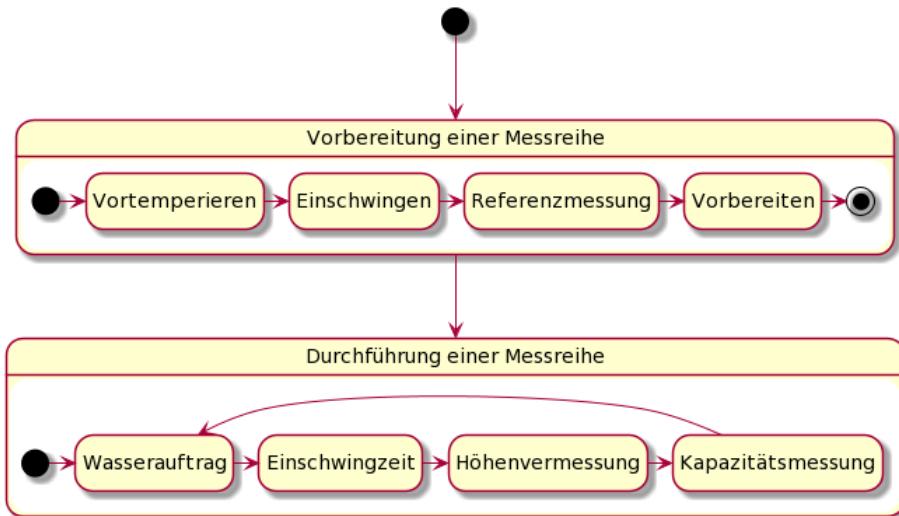


**Abbildung 20:** Höhenprofilmessung der Kühlfläche bei verschiedenen Umgebungstemperaturen mit ausgeschaltetem Peltierelement.

Im Rahmen der durchgeführten Messreihen wurde der Messstand in einer Klimakammer betrieben, mit welcher die Umgebungstemperatur auf 2 °C konstant gehalten.

## 4.5 Messdurchführung

Um Einflüsse auf die Messung durch Unregelmäßigkeiten im Messablauf zu minimieren, läuft die Vorbereitung sowie jeder Messzyklus nach einem fest definierten Ablauf gemäß Abbildung 21.



**Abbildung 21:** Verlauf einer Messdurchführung zur Bestimmung des Sensor-Verhaltens bei wachsenden Eisschichten.

Zu Zwecken der Dokumentation und zur Erklärung der Phasen sind diese in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

### 4.5.1 Vorbereitung einer Messreihe

Die aktive Lüftung des Kühlkörpers am Teststand ist ab Beginn der Messung aktiv, um ein Überhitzen des Peltierelements zu verhindern.

#### Vor temperieren der Messkammer (45 min)

Damit der Messaufbau die Umgebungstemperatur annehmen kann wird dieser bei einer Temperatur von 2 °C vor temperiert. Hierdurch wird vermieden, dass eine Verformung des Messtands durch thermische Kontraktion oder Expansion im Rahmen eines Messdurchlaufs das Messergebnis verfälscht.

### **Einschwingen der Peltier-Kühlung (600 s)**

Erst nach Erreichen eines stabilen thermischen Zustands des Sensors werden Messungen der Höhe durchgeführt.

### **Referenzmessung (450 s)**

Da der Eisauflauf direkt nicht bestimmt werden kann, wird vorab eine Höhenreferenzmessung des Sensors durchgeführt. Die Stärke des Eisauflaufs ergibt sich nach einer Messung aus der Differenz der Höhenvermessung mit Eis zur Referenzmessung.

### **Vorbereitung der Sensoroberfläche (100 s)**

Aufgrund der Oberflächenenergie des Lötstopplacks des Sensors ist eine gleichmäßige Benetzung des Sensors mit Wasser zur Eisbildung nicht direkt möglich. Als Haftvermittler wird eine Eiskristallschicht eingesetzt. Hierzu werden mit einer Zerstäuberflasche mehrere Stöße Wasser in die Klimakammer bei geöffneter Kühlkammer gesprüht. Der Wassernebel wird durch die Kammer verwirbelt und setzt sich auf dem Sensor als Raureif durch Bildung vieler kleiner Eiskristalle auf der Sensorfläche ab. Diese Kristallschicht erhöht die Oberfläche des Sensors und bildet somit eine Ankerschicht für das später aufgetragene Wasser.

#### 4.5.2 Durchführung von Messzyklen einer Messreihe

Messzyklen erfolgen nach einem wiederholbaren Ablauf. Dieser ist nachfolgend dokumentiert.

##### **Wasser-/Eisauftrag (50 s)**

Wasser wird manuell mit einer Zerstäuberflasche auf den Sensor aufgesprüht. Um ein Vereisen im oder am Taster zu vermeiden wird während dem Aufsprühen ein Tuch vor selbigen gehalten. Da dieser Schritt manuell durchgeführt werden muss sind hierzu 50 Sekunden eingeplant.

##### **Einschwingzeit (300 s)**

Damit der Sensor sowie das darauf gebildete Eis sicher einen stabilen Zustand erreicht, dient diese Zeit zum Gefrieren des Eises und zum Einschwingen der Sensor-temperatur.

Wasser das nicht direkt auf den Sensor oder die Kupferplatte trifft wird in der Klimakammer verwirbelt und setzt sich wie bei der Vorbereitung als Primer für die nächste Messung wieder auf der Eisschicht auf dem Sensor ab.

##### **Höhenvermessung (450 s)**

Die Aufnahme des Höhenprofils auf dem Sensor wird durch den Teststand auf Befehl aufgenommen. Die hierbei entstehenden Daten können während der Durchführung grafisch dargestellt werden um die Plausibilität der Werte zu überprüfen.

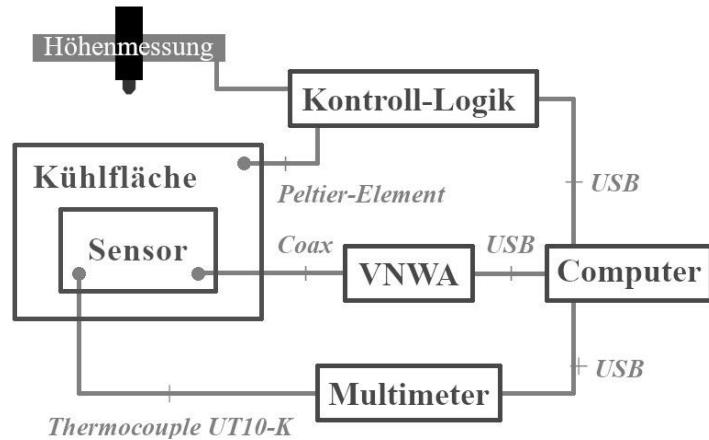
##### **Kapazitätsmessung (300 s)**

Damit eine Messung der Kapazität möglichst ohne Störeinflüsse stattfinden kann, werden für eine vorgegebene Zeit keine Operationen an der Eisschicht oder dem Sensor durchgeführt. Somit entstehen mehrere Wertepaare für Temperatur und Kapazität zur Charakterisierung des Sensors. Durch die Speicherung mehrerer Messwerte ist eine Durchschnittsbildung oder die Detektion einmalig auftretender Störungen möglich.

Über die ganze Dauer der Messung werden Temperatur, Kapazität und Dauer seit Messungsbeginn aufgezeichnet um den vollständigen Messverlauf nachvollziehen zu können und mögliche Anomalien erkennen und identifizieren zu können.

### 4.5.3 Aufzeichnung der Messwerte

Die Daten einer Messreihe werden auf einem Laptop gespeichert und direkt in zeitliche Abhängigkeit zu stellen. Abbildung 22 zeigt die Verbindungen der verwendeten Komponenten. Dies ermöglicht Einblicke in die laufende Messung um bei Bedarf den Messvorgang anzupassen oder den Ausfall einzelner Komponenten festzustellen.



**Abbildung 22:** Verbindung der Messgeräte zur Charakterisierung des Sensors.

Die Temperatur des Messtands wird sekündlich über das Multimeter abgefragt und abgespeichert. Die Höhenmessdaten, aufgenommen durch den Vereisungsmesstand, werden zusammen mit Beginn- und Endzeitpunkt der Höhenrasterung übernommen.

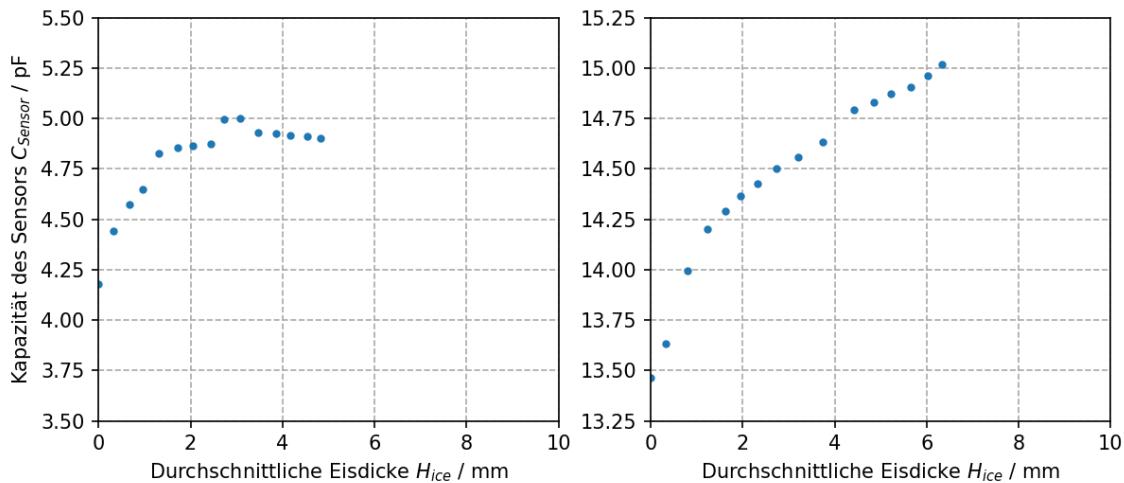
Bei Messungen mit dem LCR-Meter wurden hier ebenfalls sekündlich Daten abgefragt und zusammen mit den Temperaturdaten gespeichert.

Messungen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator wurden im Dauerlauf-Modus durchgeführt und die Daten am Ende jedes Sweeps, welcher etwa 4 Sekunden dauert, in einer Datei mit dem Endzeitpunkt des Sweeps abgespeichert.

## 5 Messergebnisse und Diskussion

### 5.1 Sensorverhalten bei wachsenden Eisschichten

Zur Bestimmung des Verhaltens des Sensors über wachsende Eisschichtdicken wurden Messungen nach 4.5 durchgeführt. Die Höhenrasterung wurde auf einen Durchschnittswert begrenzt, um die Werte mit der Simulation vergleichbar zu machen. Die Temperatur des Sensors lag im Verlauf der Messung im Bereich von  $-10^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\text{Sensor}} \leq -5^{\circ}\text{C}$  und wird in der ersten Betrachtung als konstant angenommen. Der Verlauf der Kapazität der beiden Elektrodenpaare über die Dicke des aufgebrachten Eises ist in Abbildung 23 dargestellt.



**Abbildung 23:** Gegenüberstellung der Messungen beider Elektroden über aufgetragene Eisschichtdicken.

Die Grundkapazität beider Elektroden deutlich höher als in der Simulation. Durch den Anschluss des Netzwerkanalysators wie in 4.3 beschrieben werden mehr Kapazitäten gemessen als in der Simulation berücksichtigt. Unter Beachtung der Massefläche, die im Rahmen der Messungen mit der inneren Elektrode verbunden wurde, ist ein Gegenüberstellung mit der Simulation möglich, wie sie in Abbildung 24 dargestellt ist. Für die Gegenüberstellung wird angenommen, dass die angeregte Elektrode zwischen zwei, miteinander verbundenen Elektroden gleicher Größe liegt. Einmal entspricht der Abstand dem des verwendeten Sensorpaars und einmal 3 mm, da die Schirmung mit 3 mm Abstand zu den Elektroden liegt.

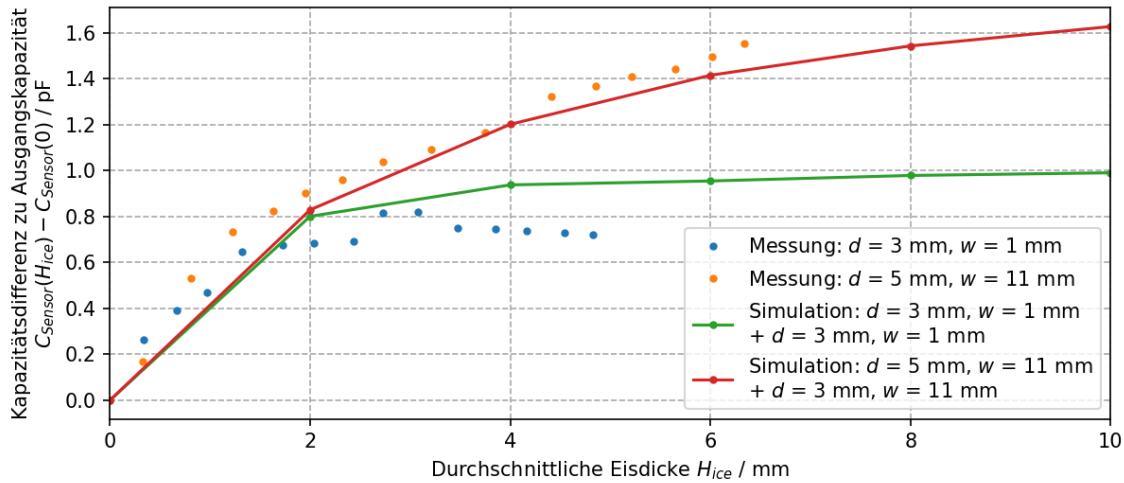


Abbildung 24: Gegenüberstellung von Messwerten und Simulationswerten für die beiden Sensoren.

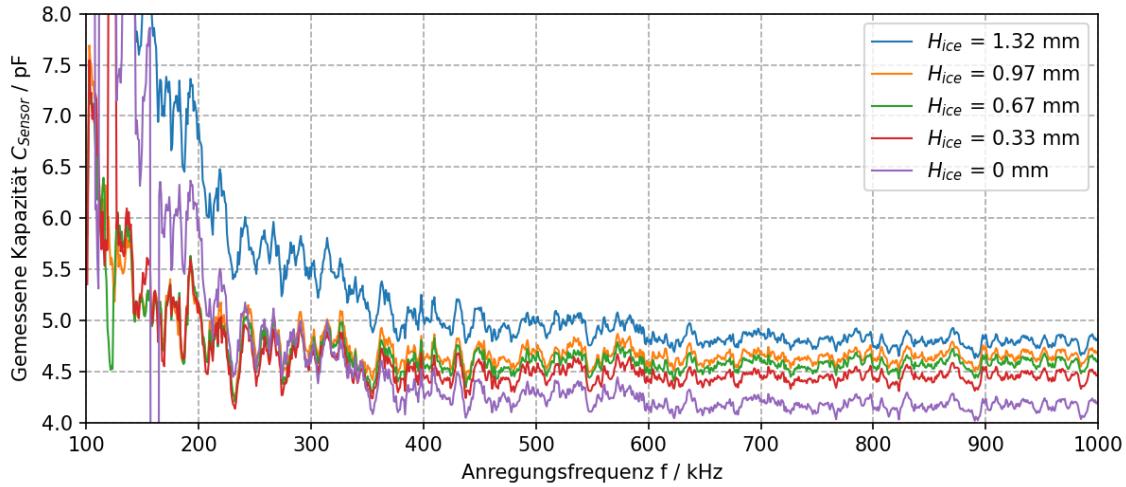
Die Messungen zeigen, dass die schmalen Elektroden für Eisschichten bis zu  $H_{ice} = 0,75$  mm eine höhere Empfindlichkeit aufweisen als die breiteren Elektroden, während eine Sättigung der Elektroden bei etwa  $H_{ice} = 1,3$  mm auftritt, wodurch steigende Schichtdicken nicht mehr erkannt werden können. Die größeren Elektroden zeigen wie erwartet im Bereich der vermessenen Eisschichtdicken keine Sättigung.

## 5.2 Frequenzverhalten des Sensors

Die im Folgenden dargestellten Frequenzspektren entsprechen einem gleitenden Mittelwert über die vorherigen  $N = 8$  Messwerte entsprechend der Formel

$$X(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=n-N}^n X(i) \quad (11)$$

Diese Art der Filterung wird auch in der Signaltheorie angewandt und wird als Tiefpass bzw. FIR-Filter bezeichnet. Die Frequenzabhängigkeit der Sensorkapazität für die schmalen Elektroden ist in Abbildung 25 dargestellt. Die dargestellten Werte sind durch einen gleitenden Mittelwert mit  $N = 8$  gefiltert.

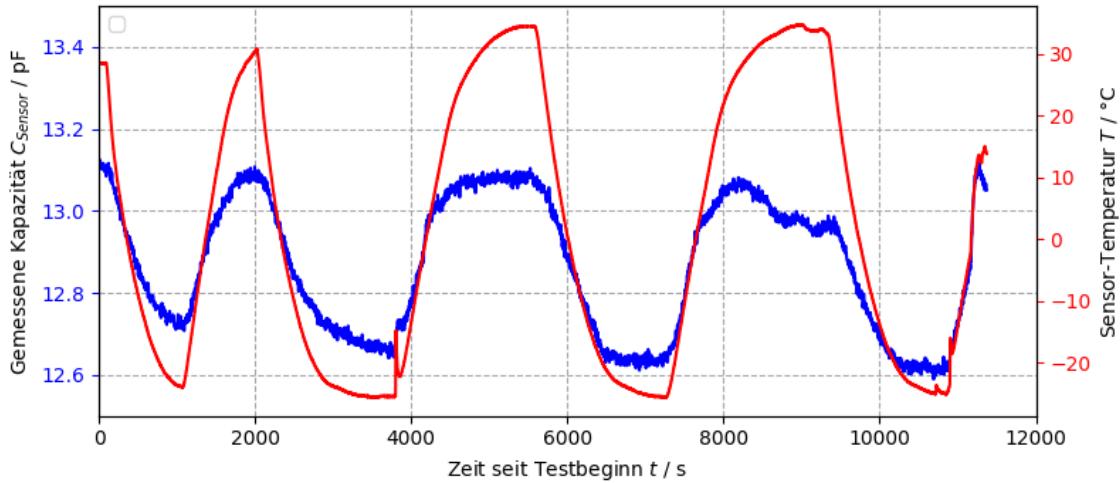


**Abbildung 25:** Kapazität der kleinen Elektroden über das ausgewertete Frequenzspektrum.

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Kapazität im Bereich ab  $f = 400$  kHz mit steigender Eisdicke gleichmäßig ansteigt. Messungen unterhalb dieses Bereiches sind aufgrund der kurzen Messdauer pro Messpunkt von  $t = 4$  ms rauschbehaftet und daher für eine Auswertung nicht gut verwendbar.

### 5.3 Charakterisierung des Temperaturverhaltens

Das Temperaturverhalten der breiten Elektroden ohne aufgetragenes Eis auf schnelle Temperaturänderungen ist in Abbildung 26 zu sehen.



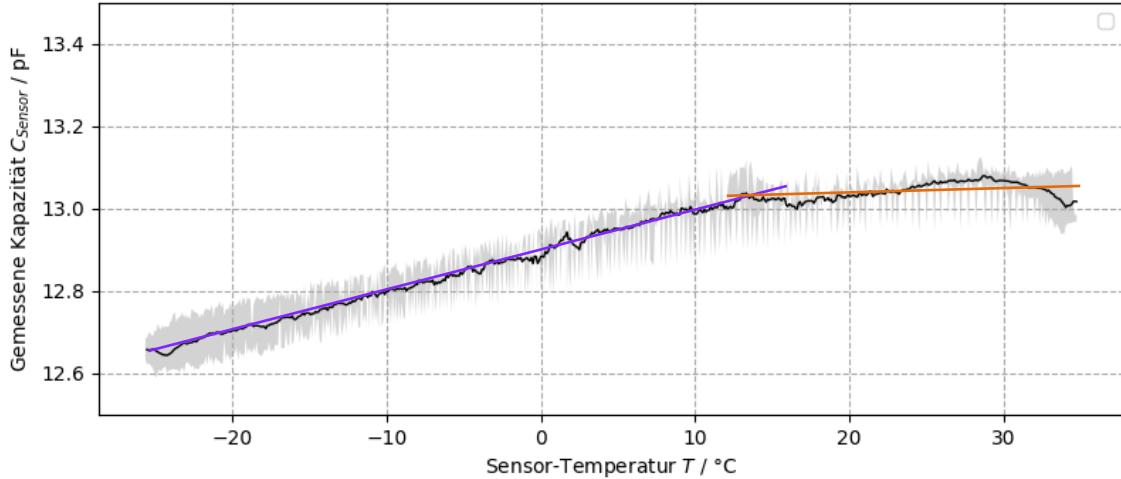
**Abbildung 26:** Gemessener Temperatur- und Kapazitätsverlauf zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens des breiten Elektrodenpaars.

Es ist erkennbar, dass die Kapazität eine Abhängigkeit zur Temperatur zu haben scheint. Jedoch zeigt der Bereich mit  $8250 \text{ s} \leq t \leq 9250 \text{ s}$ , dass die Temperatur nicht als

## 5 Messergebnisse und Diskussion

---

einziges einen Einfluss auf den Kapazitätsverlauf hat. Werden die beiden Messwerte aus Abbildung 26 gegeneinander aufgetragen entsteht der Graph in Abbildung 27.



**Abbildung 27:** Messwerte der Kapazität über Sensortemperatur mit idealisierten, linearen Trendlinien.

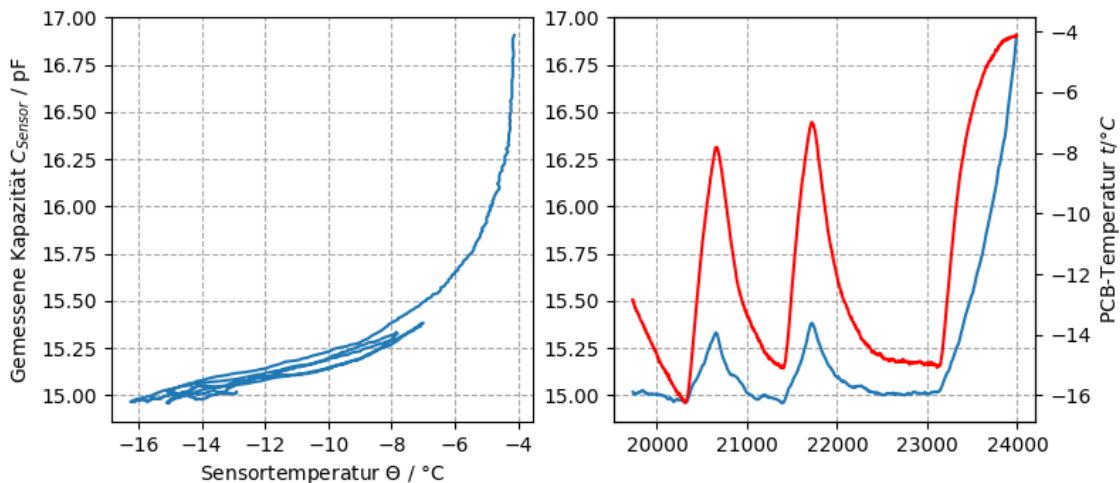
Für den Temperaturbereich  $-25 \leq T \leq 12$  folgt der Trend einer Geraden mit einer Steigung von  $0,01 \frac{pF}{^{\circ}C}$  sehr gut. Es liegt nahe, dass hierbei nicht nur die Temperatur, sondern auch die Luftfeuchte einen Einfluss auf das System hat, da der Kapazitätsverlauf für höhere Temperaturen signifikant von diesem Trend abweicht.

Unter der Annahme, die relative Luftfeuchte beträgt  $RH = 100\%$  bei  $T = 12$  °C, entspricht das einer absoluten Feuchte von  $10,65 \frac{g}{m^3}$ . Da die Klimakammer keine Feuchte in das System einführt oder dem System entnimmt, muss diese Feuchte auch vor dem Versuchsbeginn in der Umgebung bereits vorgelegen haben. Bei der Umgebungstemperatur des Labors von  $T_{Ambient} = 23$  °C ergibt sich somit eine relative Luftfeuchte von  $RH = 51,8\%$  was etwa der Zielgröße der Raumklimatisierung mit  $RH = 50\%$  entspricht.

Für  $T \leq 12$  °C kondensiert Luft beim Abkühlen primär an den Wänden der Klimakammer, da die kältere Luft weniger Feuchtigkeit halten kann. Beim Aufheizen nimmt die extrem verwirbelte Luft wieder Feuchtigkeit auf und hält die 100% relative Luftfeuchte, bis keine Feuchtigkeit mehr verfügbar ist, wodurch dann die absolute Luftfeuchte konstant bleibt, die relative Luftfeuchte jedoch sinkt. Für  $T > 12$  °C zeichnet sich eine geringere Steigung der Kapazität über die Temperatur ab.

Die Betrachtung legt nahe, dass hier das Steigen und Fallen der absoluten Luftfeuchtigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Kapazität des Sensors hat, welcher die Empfindlichkeit des Sensors auf reine Temperaturänderungen überschreitet.

Analog zur leeren Messung wurde der Sensor auch mit vereister Oberfläche vermessen und hierbei die Temperatur des Sensors selbst verändert, während die Umgebungstemperatur konstant blieb. Hierbei ergaben sich Änderungen der Kapazität wie in Abbildung 28 abgebildet.



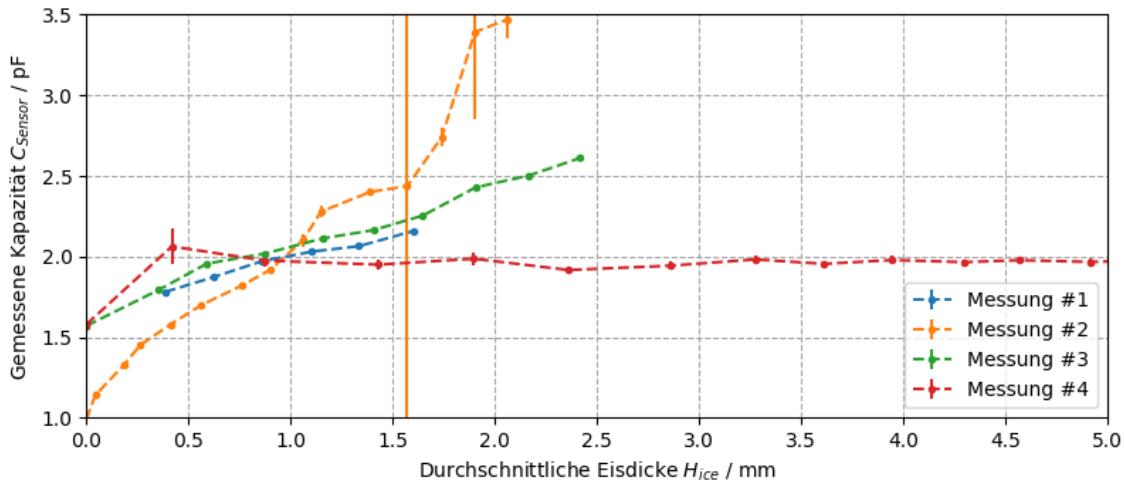
**Abbildung 28:** Kapazitäts- und Temperaturverlauf des Sensors mit Eisaufrag.

Bei einer Sensortemperatur über  $-6^{\circ}\text{C}$  steigt die Kapazität rapide an. Durch die Umgebungstemperatur von  $2^{\circ}\text{C}$  in der Klimakammer ist davon auszugehen, dass hier die obere Eisschicht antaut und somit diesen Kapazitätsanstieg verursacht.

Im unteren Bereich zwischen  $-16^{\circ}\text{C}$  und  $-8^{\circ}\text{C}$  könnte eine lineare Abhängigkeit bestehen, was jedoch aufgrund des schmalen Bereichs nur schwer gesagt werden kann. Hierbei ist es möglich, dass es entweder ein Antauen der Oberfläche oder eine Veränderung des  $\varepsilon_r$  des Eises über die Temperatur diese Werte auslöst. Auch mechanische Einflüsse durch ein Verbiegen der Kühlplatte und somit des Sensors sind denkbar.

## 5.4 Störeinflüsse ungeschirmter Messleitungen

In ersten Messdurchläufen wurden die kleinen Elektroden mit Eis auftrag mit einem LCR-Meter vermessen. Die hierbei ergebenen Messwerte der Kapazität sind in Abbildung 29 dargestellt.



**Abbildung 29:** Gemessene Kapazität der schmalen Elektroden in mehreren Messreihen.

Die Abbildung zeigt, dass die Verläufe der Kapazität kein einheitliches Bild ergeben. Im Verlauf von Messung #2 wurden die Messleitungen des LCR-Meters bewegt, was signifikante Änderungen zur Folge hatte. Es ist also darauf zu achten, dass Messleitungen auch im finalen Aufbau nicht bewegt werden können. Durch die Verwendung einer Platine auf der alle Komponenten verlötet sind wird dieses Problem im realen Anwendungsfall keine weitere Relevanz haben.

Messung #1 und Messung #3 zeigen einen linear steigenden Trend. Im Rahmen dieser Messung kam es durch schlechte Abschirmung der Anschlüsse des LCR-Meters zu einer Eisbildung direkt an den Anschlussklemmen am Board. Dies ist auch analog durch Eisbildung an den Bauteilbeinchen des Kapazitätsmesswandlers im realen Einsatz möglich. Dieser Effekt kann durch den Einsatz eines füllenden Schutzlacks für die reale Anwendung vermieden werden.

## 6 Zusammenfassung und Aussicht

Die Messungen in Abschnitt 5.1 haben gezeigt, dass das prinzipielle Konzept hinter dem Sensordesign funktioniert. Eisschichtdicken können detektiert werden und die Ergebnisse des Prototypen decken sich mit den Werten aus der Simulation.

Für eine Anwendung des Sensors auf Windkraftanlagen sollte dieser jedoch abweichend von den Prototypen auf einem möglichst dünnen, flexiblen Basismaterial gefertigt werden, um störende Einflüsse auf die Aerodynamik des Flügels zu minimieren. Hierdurch wird sich die Grundkapazität voraussichtlich erhöhen, was bei der Auswahl des Kapazitätsmesswandlers zu beachten ist.

Die Temperaturcharakterisierung in 5.3 lässt eine Abhängigkeit der Kapazität zur Luftfeuchte vermuten. Diese Messungen sollten unter kontrollierten Bedingungen der Luftfeuchte wiederholt werden, um diesen Zusammenhang zu überprüfen. Sollte dieser Ansatz stimmen, so wäre auch eine Früherkennung von Vereisung vor dem Auftreten selber denkbar.

Im Rahmen dieser Messungen wurde der Sensor vor jeder Messreihe mit Isopropanol gereinigt. Einflüsse von Verschmutzung oder Alterung des Lötstopplacks unter Natureinflüssen wurde somit nicht geprüft.

Diese Sensoren oder eine vereinfachte Form könnte auch für Solarzellen zur Erkennung von Schneebelag und zum Auslösen von entsprechenden Vorrichtungen zum Entfernen von Schnee eingesetzt werden. Auch wären auch ein Einsatz im Automobilbereich zur Erkennung von Eisbildung auf LKW-Dächern denkbar, um vor Eisplatten zu warnen, die eine Gefahr für andere Verkehrsteilnehmer darstellen könnte.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] W. Demtröder, *Electrodynamics and Optics*, Kaiserslautern: Springer Nature, 2019.
- [2] U. Kilian et al, *Lexikon der Physik*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2003.
- [3] D. G. Archer und P. Wang, „The Dielectric Constant of Water and Debye-Hückel Limiting Law Slopes.,“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, p. 371–411, 1990.
- [4] Würth Elektronik, „WE-Online,“ 01 Oktober 2013. [Online]. Available: [https://www.we-online.com/web/de/index.php/show/media/04\\_leiterplatte/2013\\_1/webinare\\_1/signalintegritae/Webinar\\_Signal\\_final.pdf](https://www.we-online.com/web/de/index.php/show/media/04_leiterplatte/2013_1/webinare_1/signalintegritae/Webinar_Signal_final.pdf). [Zugriff am 2021 Oktober 20].
- [5] Texas Instruments Inc., „Capacitive frost or ice detection reference design,“ Texas Instruments, Dallas, Texas, 2017.
- [6] Stündle, „Wikimedia Commons,“ 27 Juli 2011. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektrisches\\_Tor\\_mit\\_Wellenparameter\\_Neu.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektrisches_Tor_mit_Wellenparameter_Neu.svg). [Zugriff am 25 September 2021].
- [7] J. C. Berg, *Wettability*, Seattle: Marcel Dekker Inc., 1993.
- [8] K. Wei, Y. Yang, H. Zuo und D. Zhong, „A review on ice detection technology and ice elimination,“ *Wind Energy*, pp. 433-457, 2020.
- [9] S. Žuk, A. Pietriková und I. Vehec, „Possibilities of planar capacitive rain sensor manufacturing by thick film technology,“ *Acta Electrotechnica et Informatica*, pp. 11-16, Januar 2018.

- [10] eologix, „Winterwind,“ Februar 2016. [Online]. Available: [http://winterwind.se/wp-content/uploads/2016/02/4\\_2\\_5\\_Moser\\_Real-World\\_icing\\_distribution\\_analysis\\_based\\_on\\_data\\_from\\_surface\\_sensors-1.pdf](http://winterwind.se/wp-content/uploads/2016/02/4_2_5_Moser_Real-World_icing_distribution_analysis_based_on_data_from_surface_sensors-1.pdf). [Zugriff am 01 Oktober 2021].
- [11] R. E. Bredesen et al., „IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates,“ IEA Wind, Roskilde, 2017.
- [12] S. K. Thomas, R. P. Cassoni und C. D. MacArthur, Aircraft Anti-Icing and De-Icing Techniques and Modeling, Ohio: Journal of Aircraft, 1996.
- [13] Analog Devices, „AD7151 Datasheet & Product info,“ Analog Devices, [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7151.html>. [Zugriff am 17 September 2021].
- [14] Analog Devices, „AD7150 Datasheet & Product info,“ Analog Devices, [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7150.html>. [Zugriff am 17 September 2021].
- [15] Analog Devices, „AD7745 Datasheet & Product info,“ Analog Devices, [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad7745.html>. [Zugriff am 17 September 2021].
- [16] Texas Instruments, „FDC1004 data sheet, product information and support,“ April 2015. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/fdc1004.pdf>. [Zugriff am 17 September 2021].
- [17] Texas Instruments, „FDC2212 data sheet, product information and support,“ Mai 2016. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/fdc2212-q1.pdf>. [Zugriff am 17 September 2021].

- [18] R. Wei, W. Wang, X. Xiao und Q. Chen, „A Low-Power Delta-Sigma Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensors,“ *IEEE Access*, pp. 78281-78288, 13 Juni 2019.

## 8 Abkürzungsverzeichnis

### A

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene	18
-----	---------------------------------	----

### D

DUT	Device under test / Zu vermessende Komponente	19
-----	---	----

### E

EMV	Elektromagnatische Verträglichkeit	17
-----	------------------------------------	----

### F

FIR	Finite impulse response	26
-----	-------------------------	----

### I

I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit	14
------------------	--------------------------	----

IC	Integrated circuit / Integrierter Schaltkreis	16
----	---	----

IEA	International Energy Agency	11
-----	-----------------------------	----

### T

THT	Trough hole technology	17
-----	------------------------	----

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kapazität zwischen zwei parallel angeordneten Platten im Querschnitt ...	2
Abbildung 2: Elektrisches Feld zwischen zwei, in einer Ebene angeordneten Platten....	3
Abbildung 3: Parallele Platten eines Plattenkondensators als Füllstandsmesser im Querschnitt.....	4
Abbildung 4: Vertikal verbauter, koplanarer Kondensator zur Füllstandsermittlung. ....	5
Abbildung 5: Horizontal platzierte, koplanarer Kondensator zur Detektion von Füllständen im Querschnitt .....	5
Abbildung 6: Elektrisches Tor mit Klemmspannung $U\nu$ und Klemmenstrom $I\nu$ für Impedanz- und Admittanzbetrachtung (links), Tor mit eingehen eingehenden Welle $a\nu2$ und Reflexion $b\nu1$ für Betrachtung der Streuparameter (rechts) [6].....	6
Abbildung 7: LC-Parallelschwingkreis zur Bestimmung einer unbekannten Kapazität anhand der Resonanzfrequenz.....	7
Abbildung 8: RC-Ladeschaltung zur Ermittlung einer unbekannten Kapazität über die Sprungantwort.....	8
Abbildung 9: Grade der Benetzbarkeit einer Oberfläche in Abhängigkeit der Benetzungswinkel, Nachzeichnung nach [7]. .....	8
Abbildung 10: Zwei typische Arten von auftretendem Eis auf Windkraftanlagen. Harter Frost (links), Glasierung, Weicher Frost (rechts) [8].....	9
Abbildung 11: Blockschaltbild des eingesetzten Kapazitätsmesswandlers AD7151 [13].	
.....	14
Abbildung 12: Simulationsmodell des Sensors auf einer 1,6 mm starken Grundplatte mit einer Breite von 50 mm und einer Tiefe von 50 mm. Die Elektroden sind 40 mm lang und wurden mit variierenden Breiten $w$ und Abständen $d$ simuliert.....	15
Abbildung 13: Simulierte Kapazitätswerte von Elektrodenpaaren mit Breite $w$ und Elektrodenabstand $d$ bei verschiedenen Eisschichtdicken. ....	15

Abbildung 14: Simulierte Kapazitäten von Elektrodenpaaren mit festem Elektrodenabstand $d$ und verschiedenen Elektrodenbreiten $w$ verschieden Eisschichtdicken.....	16
Abbildung 15: Simulierte Kapazität des Sensors über die Eisdicke mit Leiterbahnabstand $d$ und Leiterbahnbreiten $w$ .....	16
Abbildung 16: Oberseite des finalen Layouts des kapazitiven Vereisungssensors .....	17
Abbildung 17: Vereinfachte Darstellung des Sensors als Eintor ohne parasitäre Widerstände. ....	18
Abbildung 18: Kühlkammer des Messaufbaus in Seitenansicht mit schematischem Aufbau. ....	19
Abbildung 19: XYZ-Antrieb zur taktilen Abtastung einer Oberfläche mit eingespannter Kühlkammer. ....	20
Abbildung 20: Höhenprofilmessung der Kühlfläche bei verschiedenen Umgebungstemperaturen mit ausgeschaltetem Peltierelement. ....	20
Abbildung 21: Verlauf einer Messdurchführung zur Bestimmung des Sensor-Verhaltens bei wachsenden Eisschichten.....	21
Abbildung 22: Verbindung der Messgeräte zur Charakterisierung des Sensors.....	24
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Messungen beider Elektroden über aufgetragene Eisschichtdicken.....	25
Abbildung 24: Gegenüberstellung von Messwerten und Simulationswerten für die beiden Sensoren.....	26
Abbildung 25: Kapazität der kleinen Elektroden über das ausgewertete Frequenzspektrum.....	27
Abbildung 26: Gemessener Temperatur- und Kapazitätsverlauf zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens des breiten Elektrodenpaars.....	27
Abbildung 27: Messwerte der Kapazität über Sensortemperatur mit idealisierten, linearen Trendlinien. ....	28

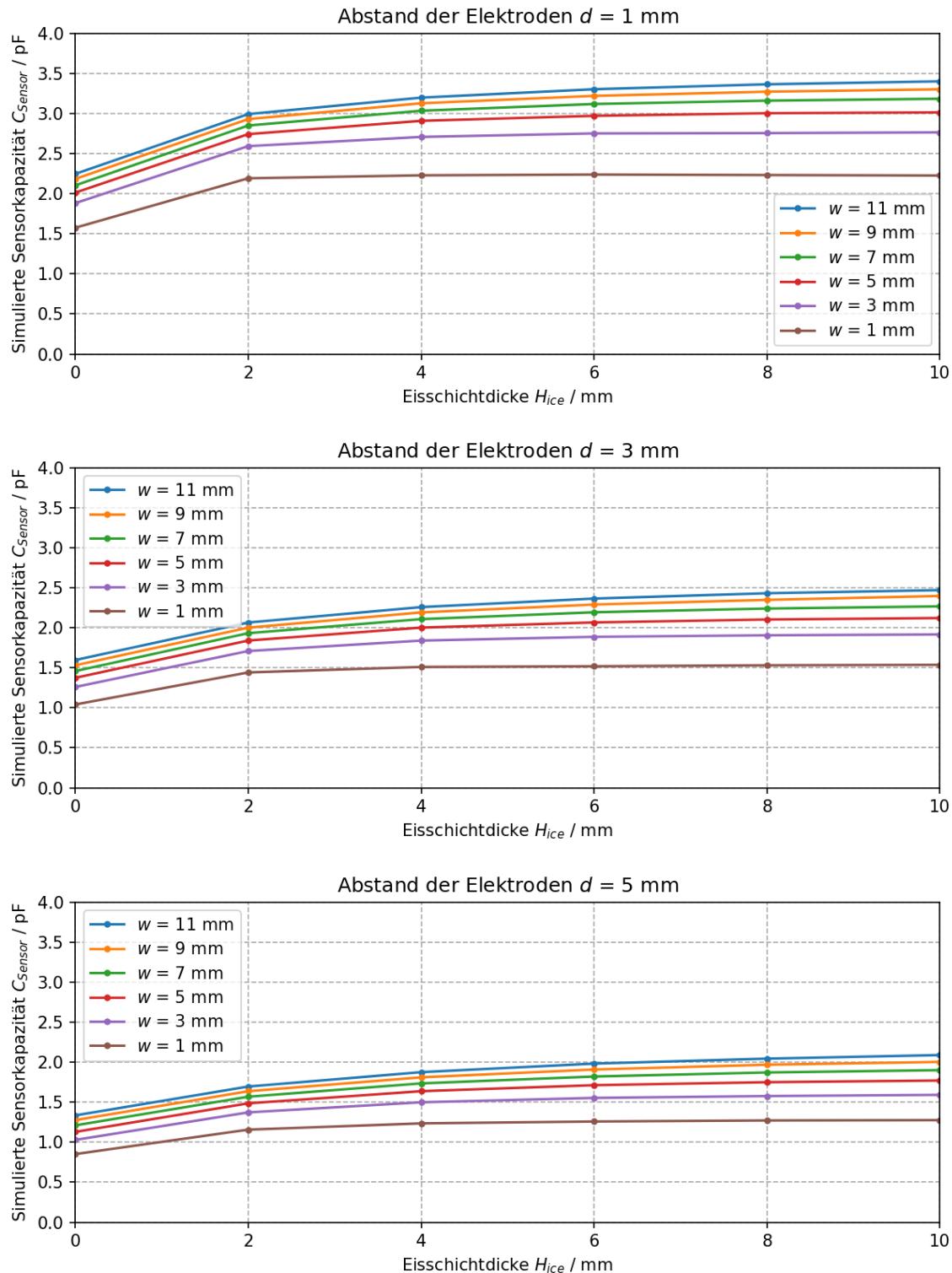
## 9 Abbildungsverzeichnis

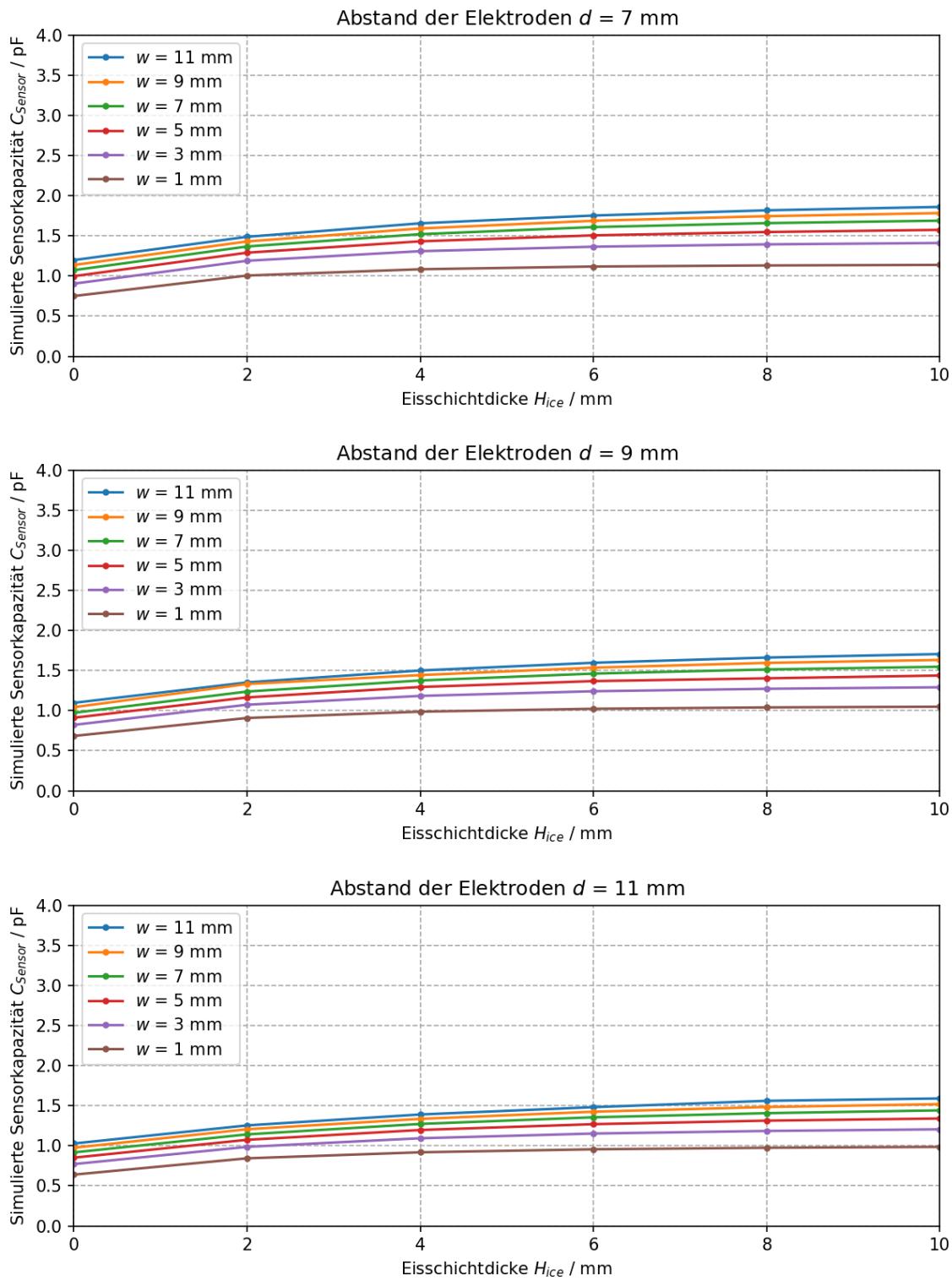
---

Abbildung 28: Kapazitäts- und Temperaturverlauf des Sensors mit Eisaufrag.	29
Abbildung 29: Gemessene Kapazität der schmalen Elektroden in mehreren Messreihen.	
.....	30

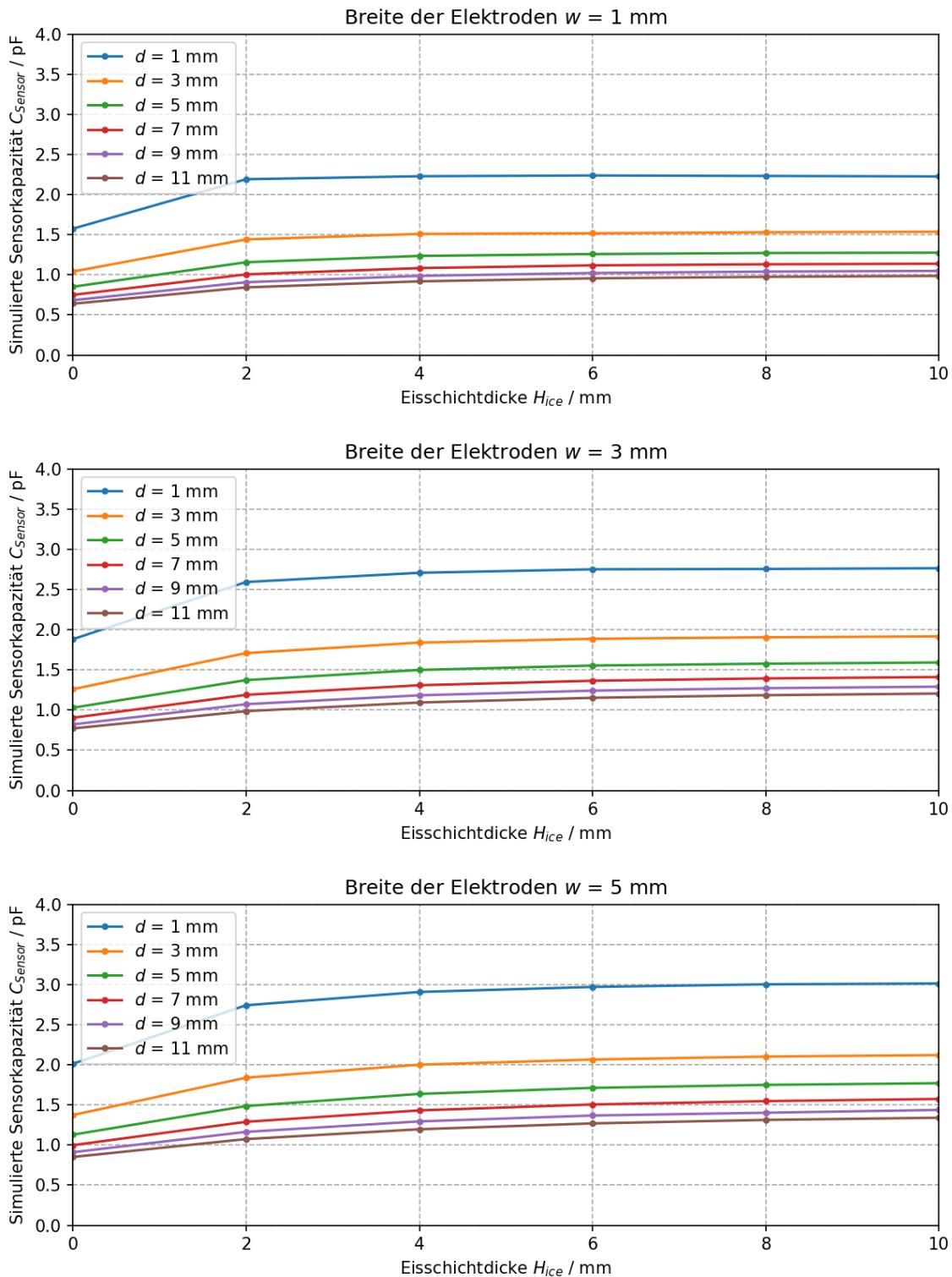
## 10 Anhang

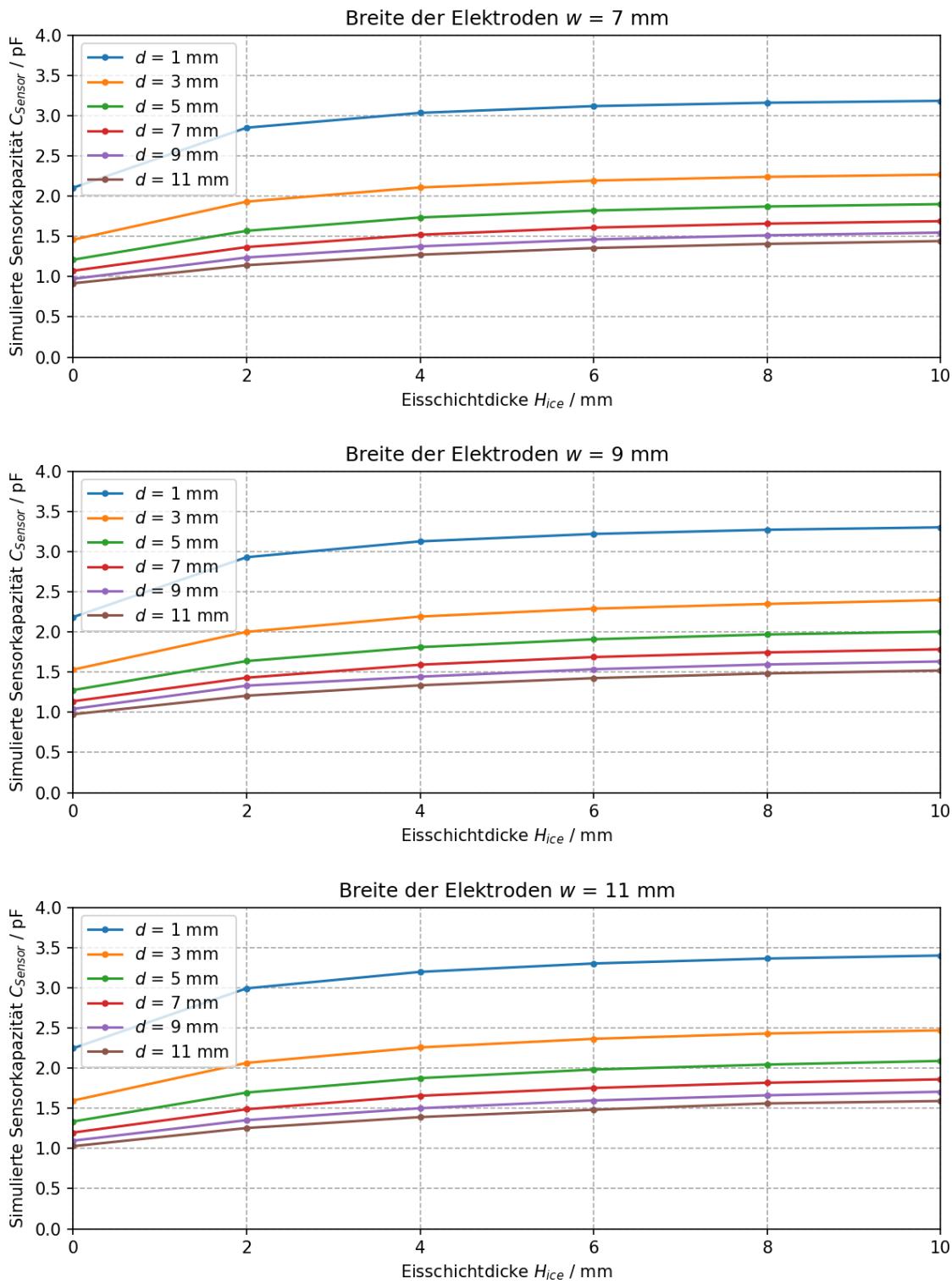
### 10.1 Simulationsergebnisse: Kapazität über Elektrodenbreite





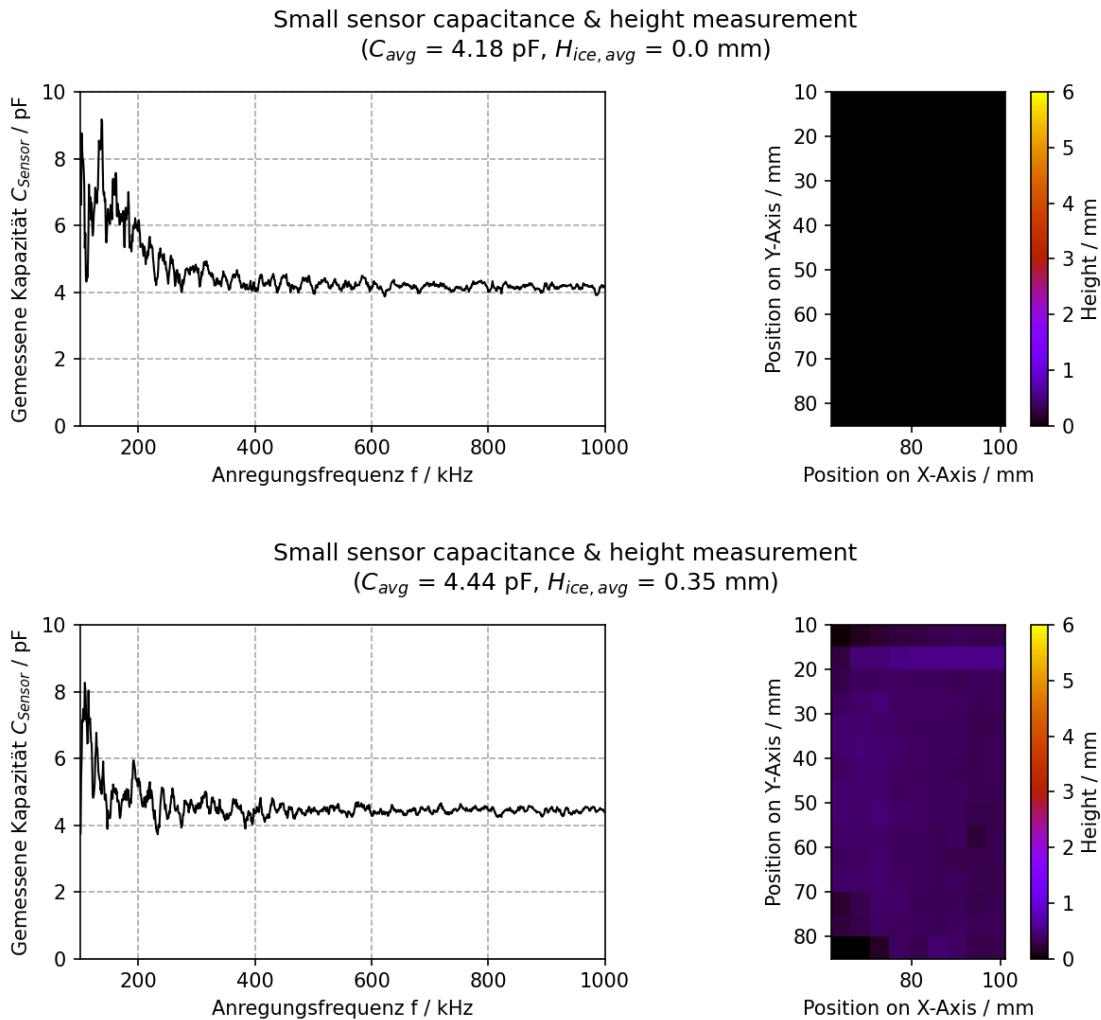
## 10.2 Simulationsergebnisse: Kapazität über Elektrodenabstand



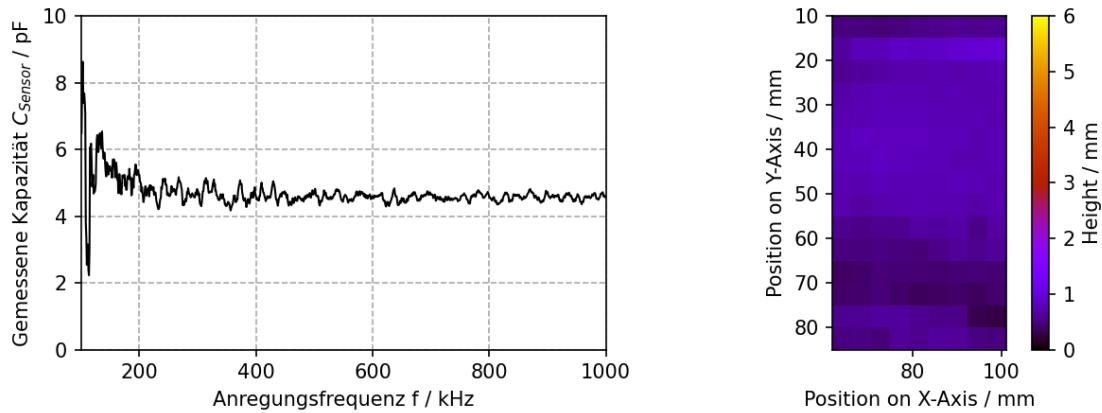


### 10.3 Messergebnisse: Kapazität über Eisdicke für schmale Elektroden

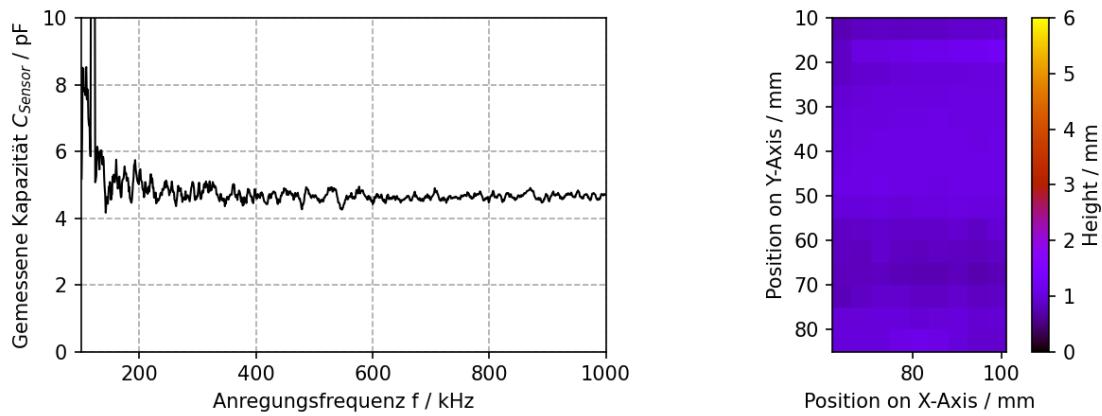
Der Mittelwert der Kapazität  $C_{avg}$  ergibt sich aus dem Mittelwert der Messwerte für  $400 \text{ kHz} \leq f \leq 1000 \text{ kHz}$ . Die Höhenangabe  $H_{ice, avg}$  stellt einen Mittelwert über alle Höhenmesswerte dar.



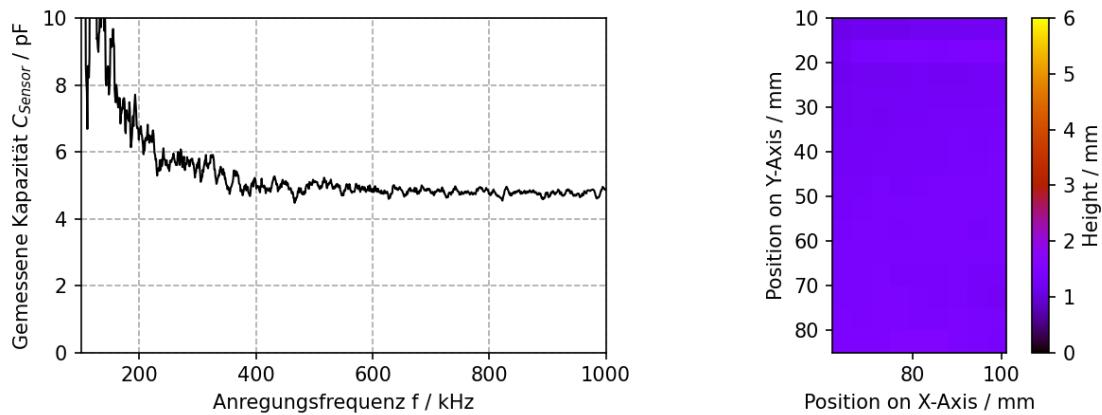
Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 4.57 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 0.65 \text{ mm})$

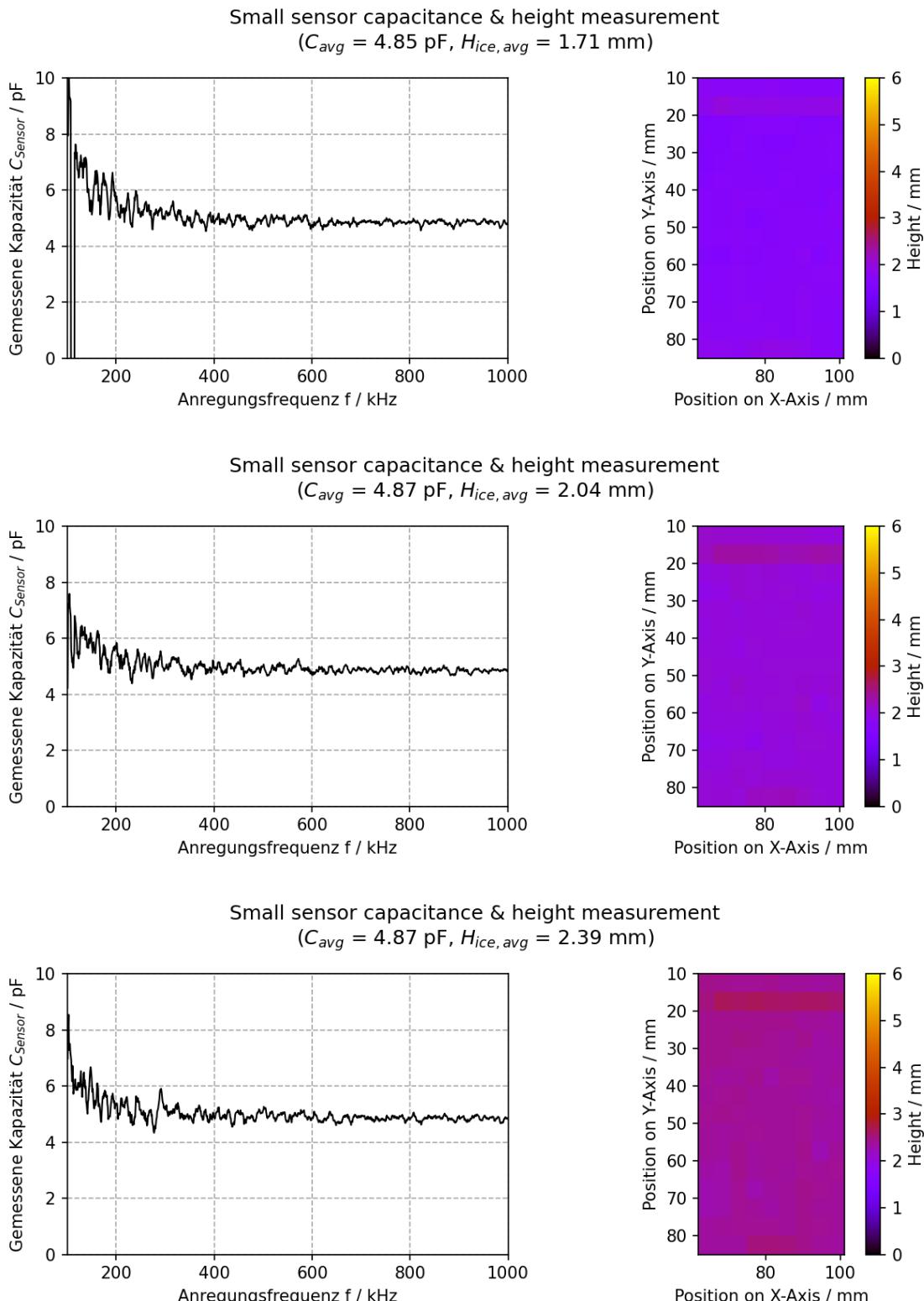


Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 4.65 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 0.97 \text{ mm})$

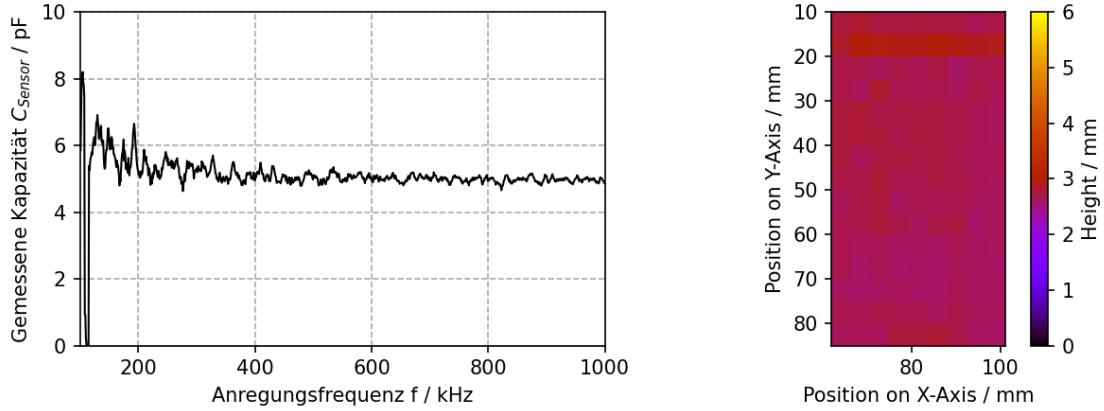


Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 4.83 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 1.34 \text{ mm})$

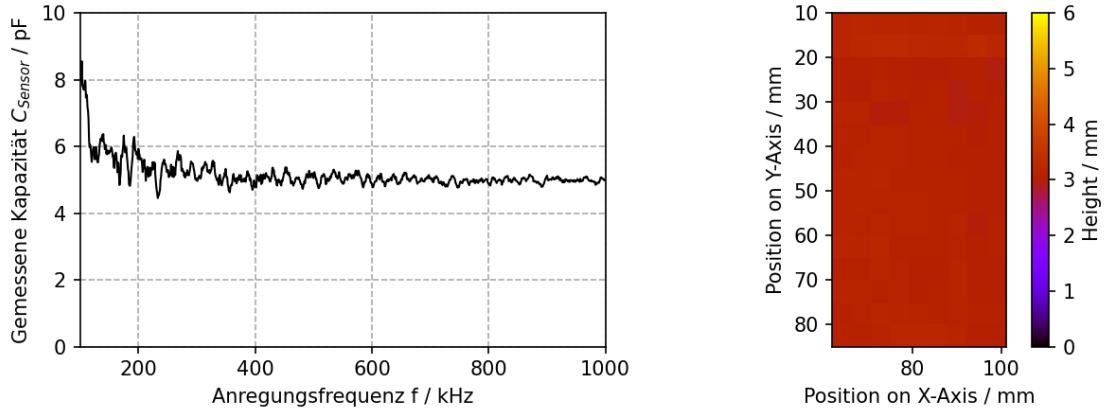




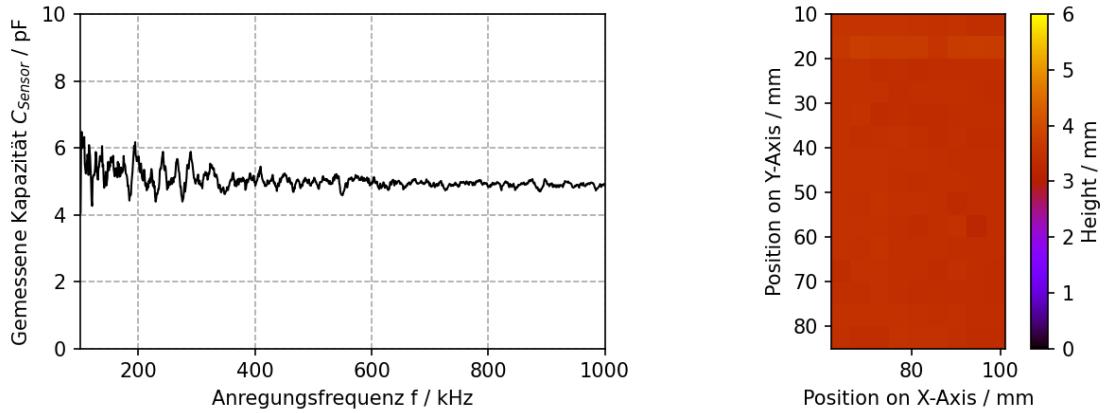
Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 5.0 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 2.71 \text{ mm})$

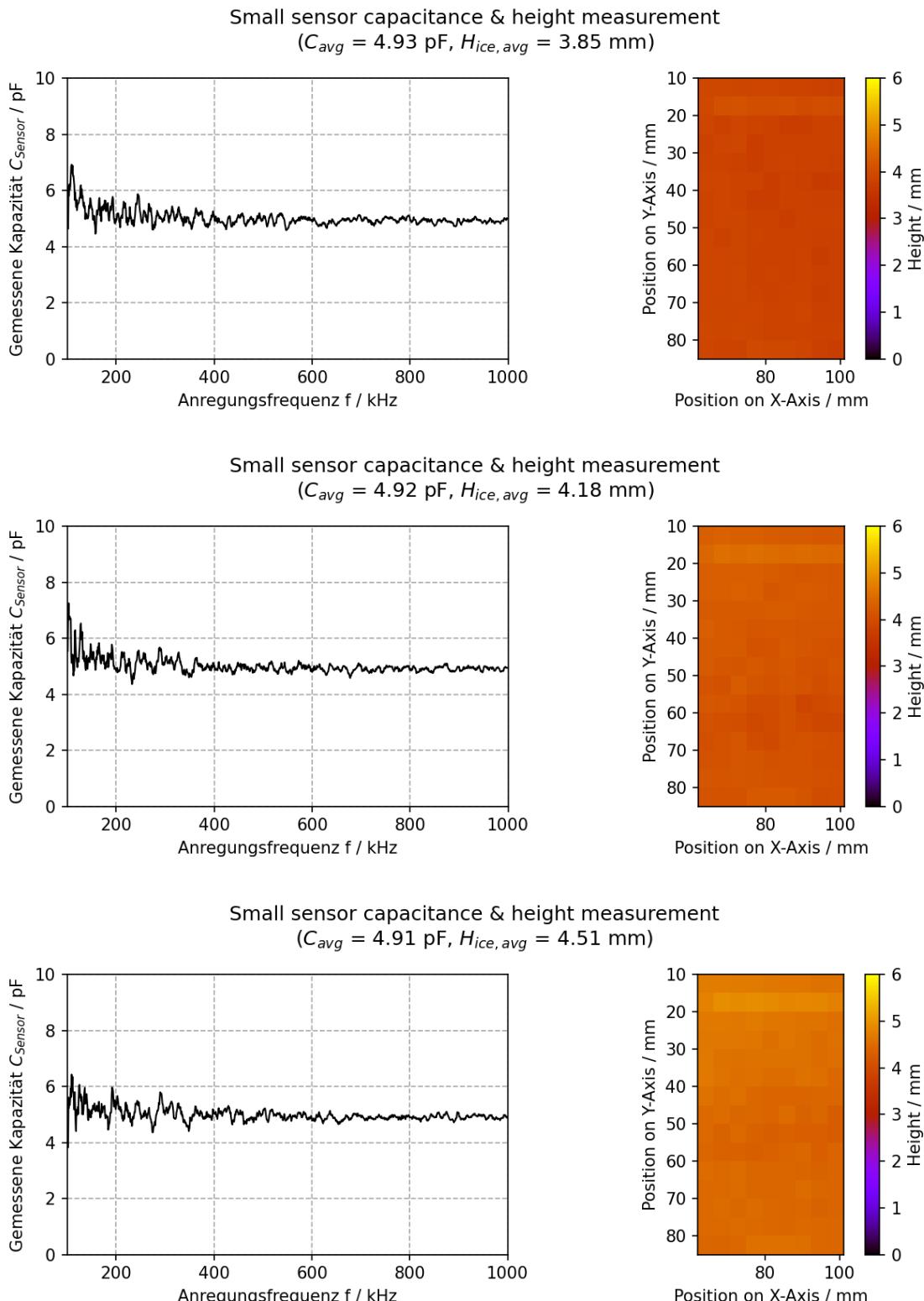


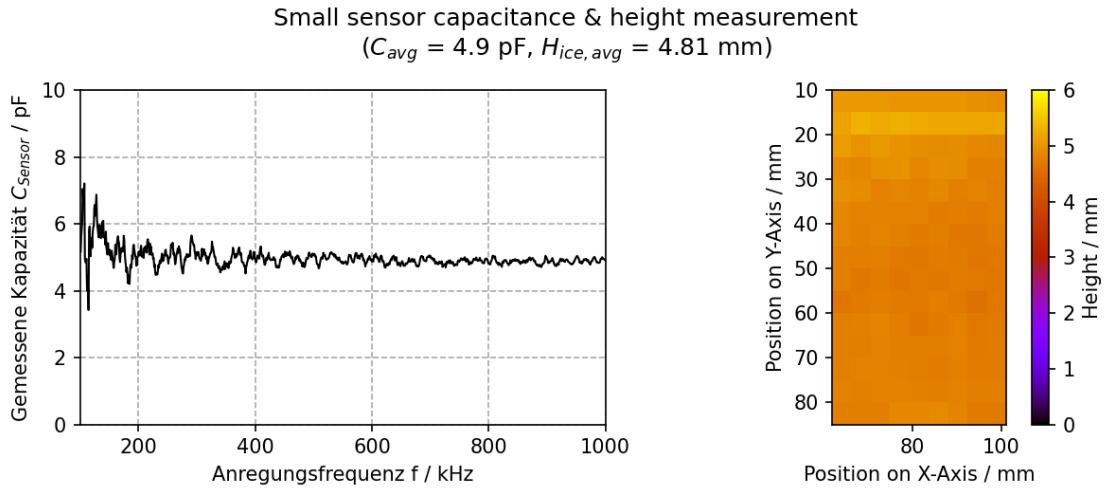
Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 5.0 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 3.08 \text{ mm})$



Small sensor capacitance & height measurement  
 $(C_{avg} = 4.93 \text{ pF}, H_{ice, avg} = 3.44 \text{ mm})$







## 10.4 Messergebnisse: Kapazität über Eisdicke für breite Elektroden

Der Mittelwert der Kapazität  $c_{avg}$  ergibt sich aus dem Mittelwert der Messwerte für  $400 \text{ kHz} \leq f \leq 1000 \text{ kHz}$ . Die Höhenangabe  $H_{ice, avg}$  stellt einen Mittelwert über alle Höhenmesswerte dar.

