

Entwurf und Charakterisierung eines kapazitiven Sensors zur Detektion von Eisschichten

Bachelorthesis von Kevin R. Mader

05.11.2021

Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

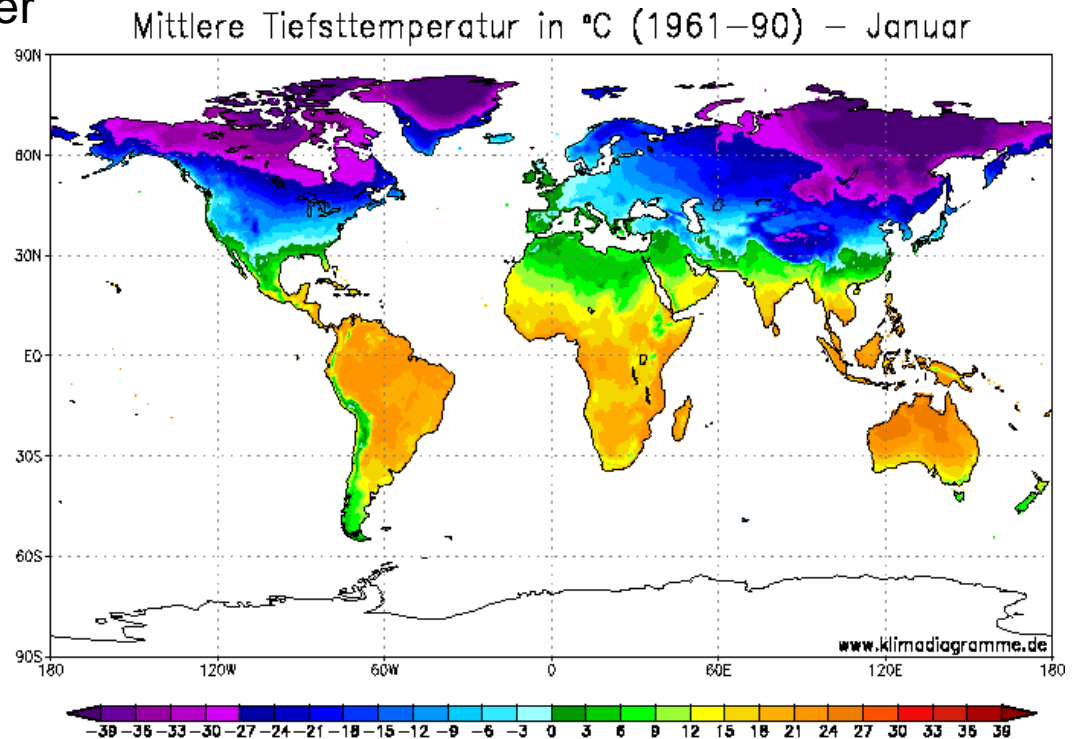
- Senkung der Effizienz
- Erhöhte mechanische Belastung der Windkraftanlage
- Eiswurf: Gefahr für Mensch, Tier und Gebäude
- Ab kritischer Eisschicht muss die Anlage abgeschaltet werden



(Fakoerde et al)

Motivation

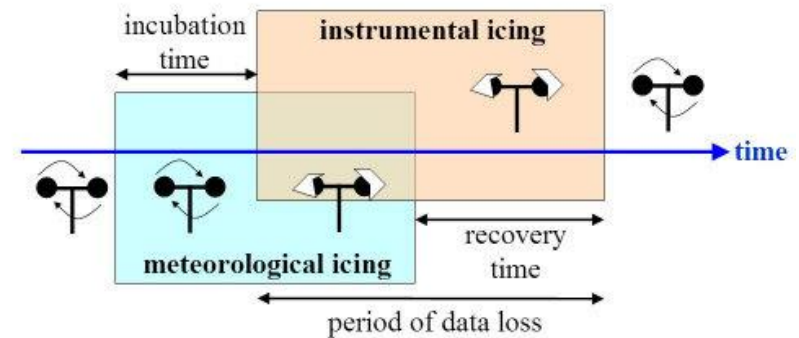
- Elektrische Energie sollte nah beim Verbraucher generiert werden
- Im Norden starke Winde, aber Vereisungsproblematik
- Vereisung bringt Einbußen der Energiegewinnung von bis zu 50 % des Jahresertrags



Daten: IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

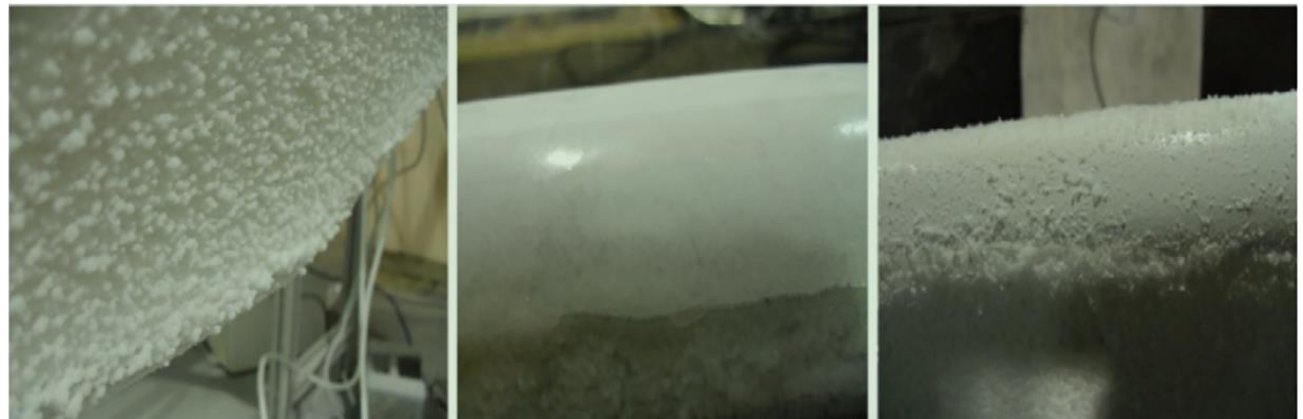
Vereisungsarten

- Meteorologische Vereisung
- Instrumentelle Vereisung



(Kexiang Wei et al)

- Harter Frost
- Klareis
- Weicher Frost/
Raureif



(Kexiang Wei et al)

- Besprühen von Windkraftanlagen mit warmem Wasser
- Beheizen mit Verlustwärme aus der Gondel
 - Energieverlust beträgt etwa 120 kW für eine 2.0 MW Windkraftanlage ab 50% Auslastung
- Aktives Beheizen mit Heizelementen
- Schwarze Rotorblätter
- Lotus-Effekt



(Energiforsk)



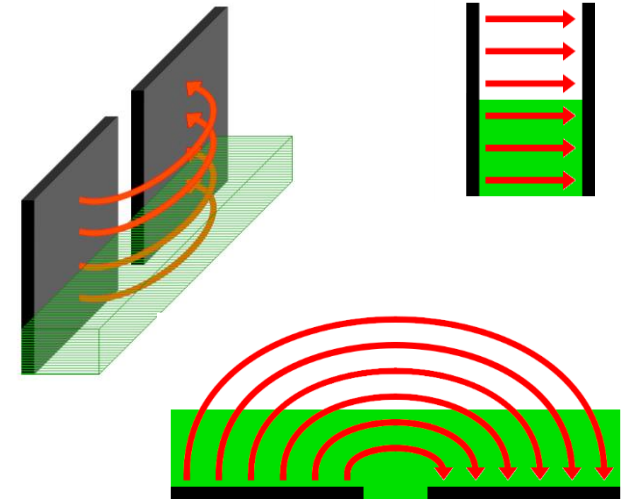
(Fakoerde et al)

- Vibrationsanalyse
- Windstärke und Leistungsausgabe
- Kapazitive Detektion
 - Auf der Gondel
 - Am Rotorblatt



(Fakoerde et al)

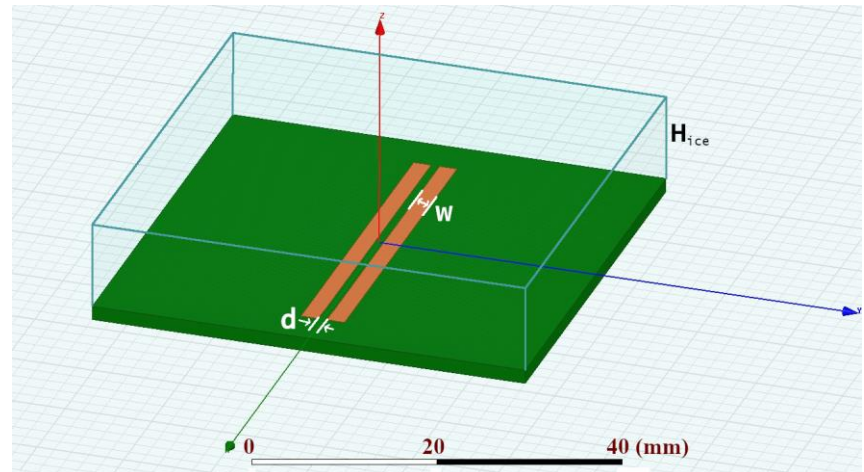
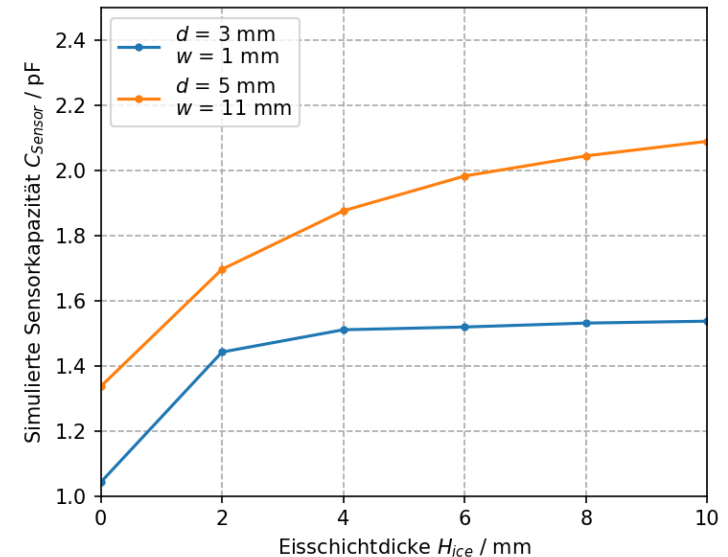
- Plattenkondensator:
 - Große Fläche $b \cdot t$ zueinander
 - Gerade Feldlinien zwischen den Platten
 - Kapazität gegeben durch $C = \frac{b \cdot t}{d} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0$
 - Lineares Signal über steigenden Füllstand
- Vertikaler koplanarer Kondensator
 - Geringe Fläche $b \cdot t$
 - Überwiegend Streufelder
 - Lineares Signal über steigenden Füllstand
- Horizontaler koplanarer Kondensator
 - Mit steigendem Füllstand tritt Sättigung ein



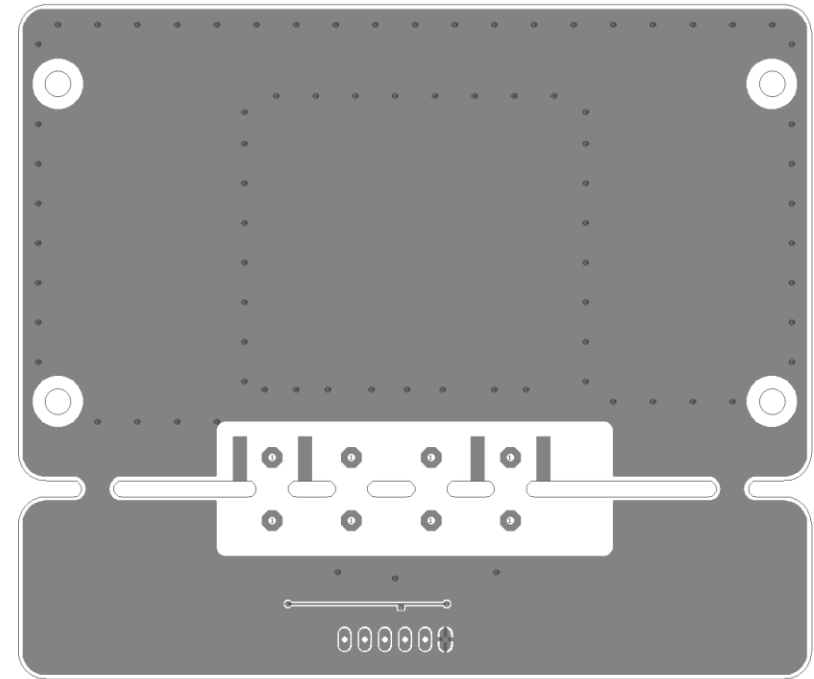
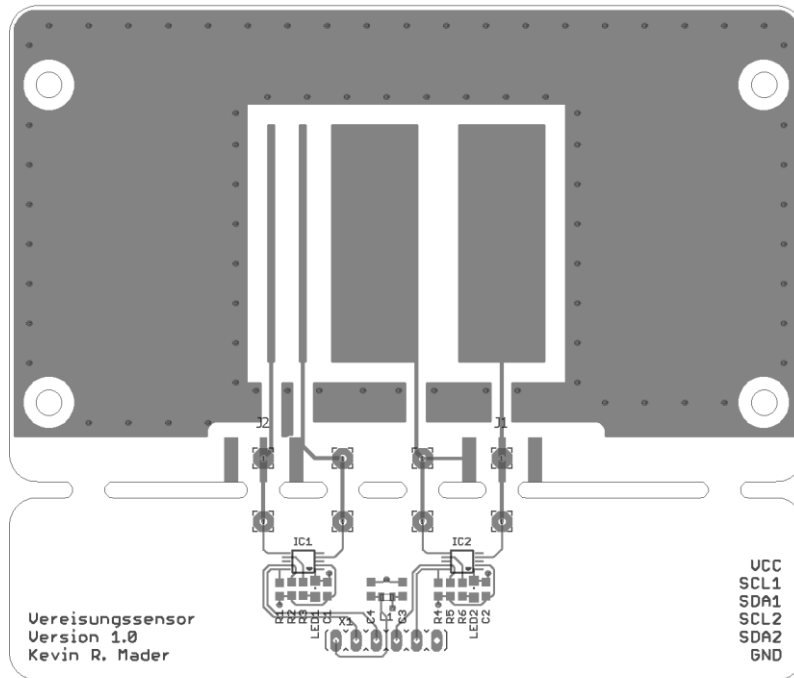
Material	Relative Permittivität ϵ_r
Vakuum	1,0
Luft	1,000576 (0 °C, 105 Pa)
	1,05404 (0 °C, 107 Pa)
Wasser	87,9 (0 °C)
	80,2 (20 °C)
Eis	100 (– 20 °C, $f = 50$ Hz)
	3,2 (– 20 °C, $f > 100$ kHz)
FR-4	3,2 ... 4,7

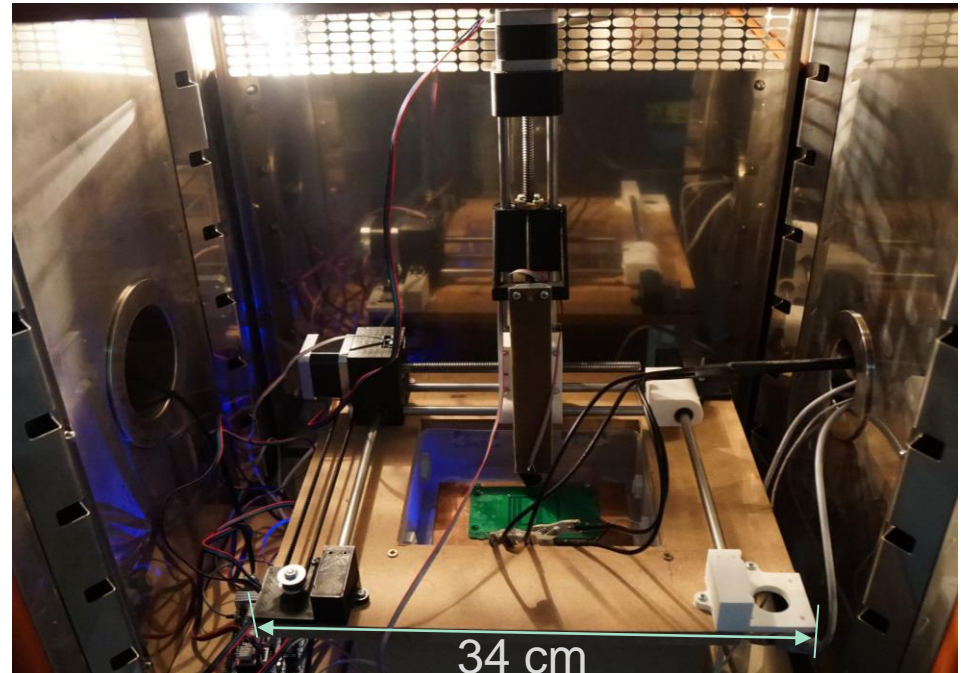
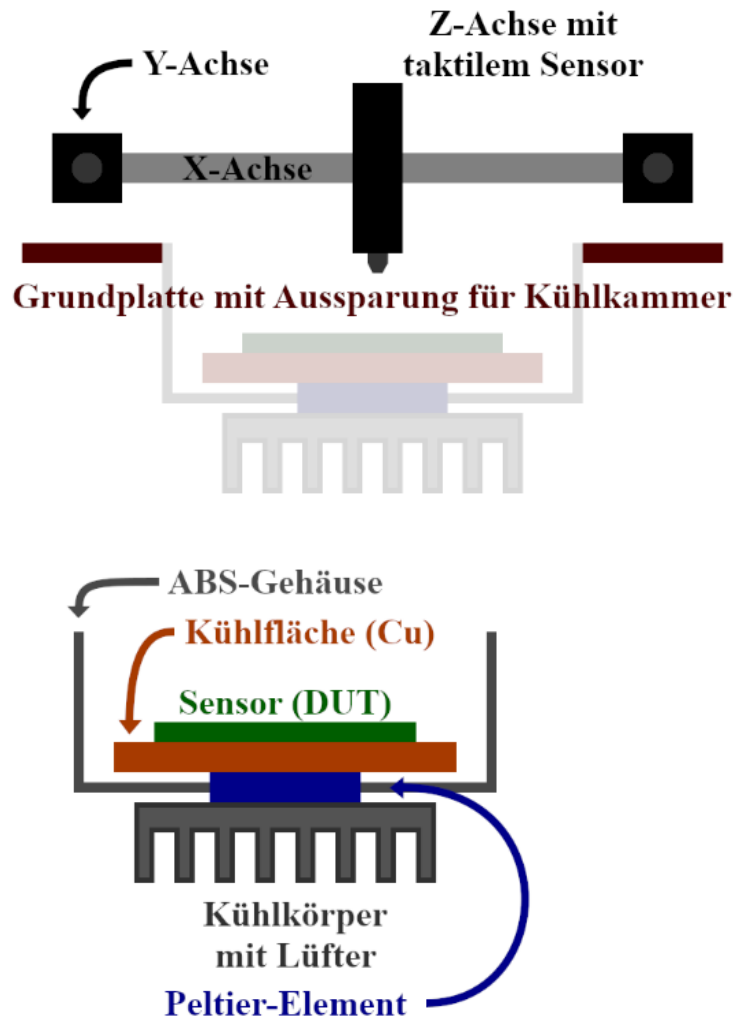
Simulation der Sensor-Elektroden

- Simulation mit Leiterbahnbreiten und –abständen {1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm}
- Elektroden auf FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$)
- Umgeben von Vakuum ($\epsilon_r = 1$)
- Auftrag mit Eis ($\epsilon_r = 3,2$)

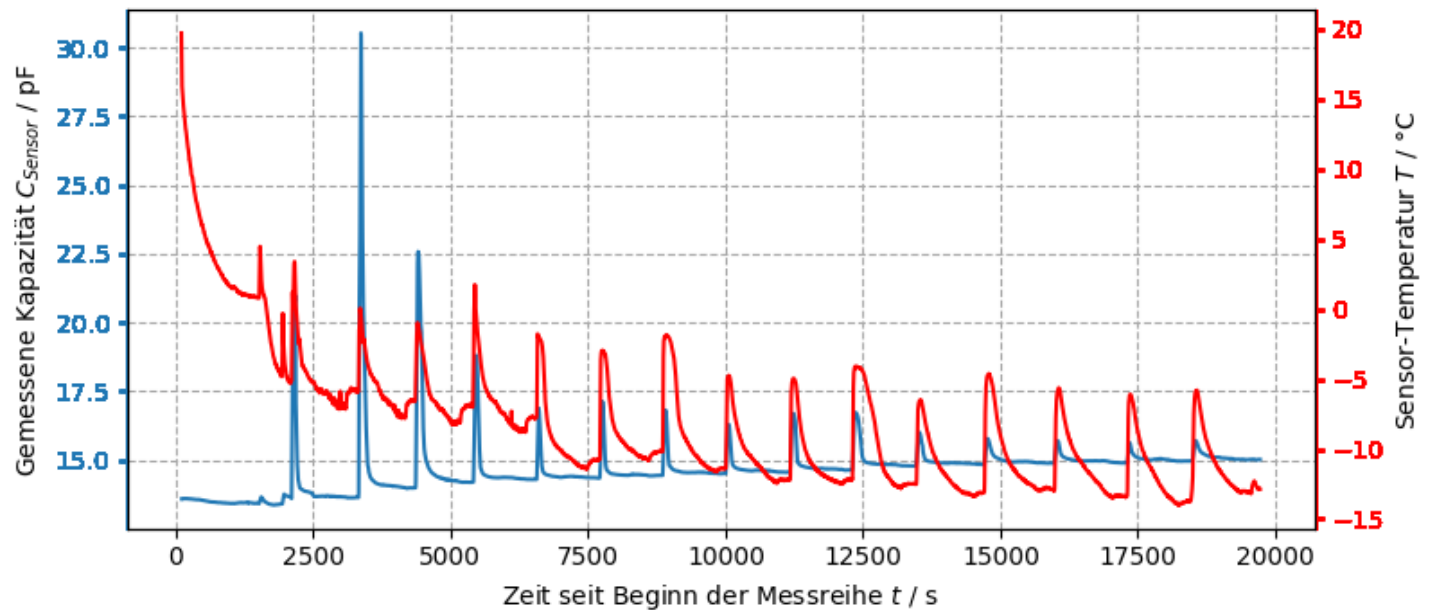


Entwurfener Prototyp





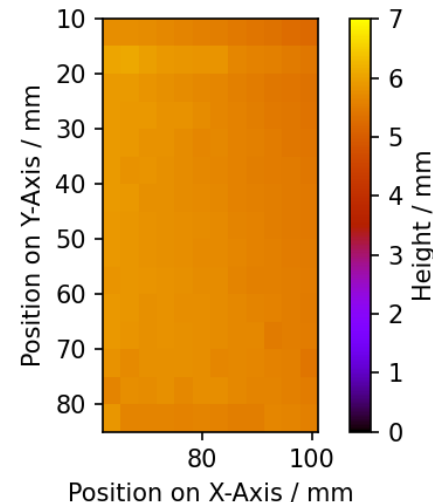
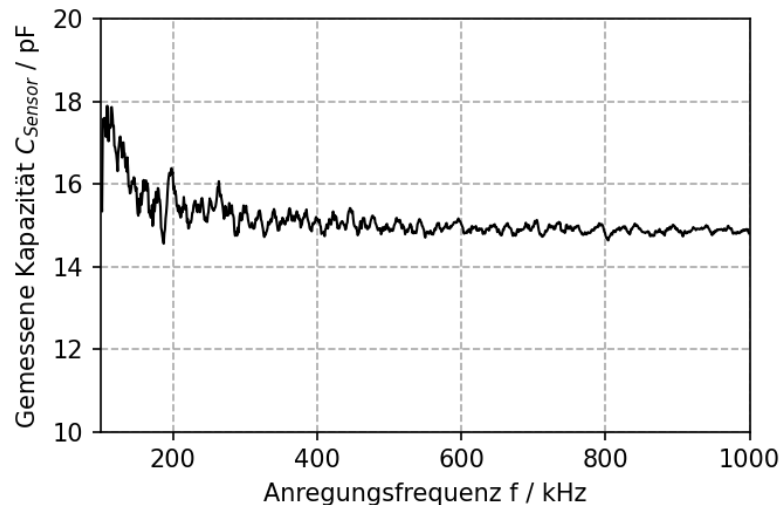
1. Wasser aufsprühen
2. Einschwingen
3. Höhenvermessung
4. Kapazitätsmessung



Zusammenführen der Messwerte am Computer mit Live-Visualisierung:

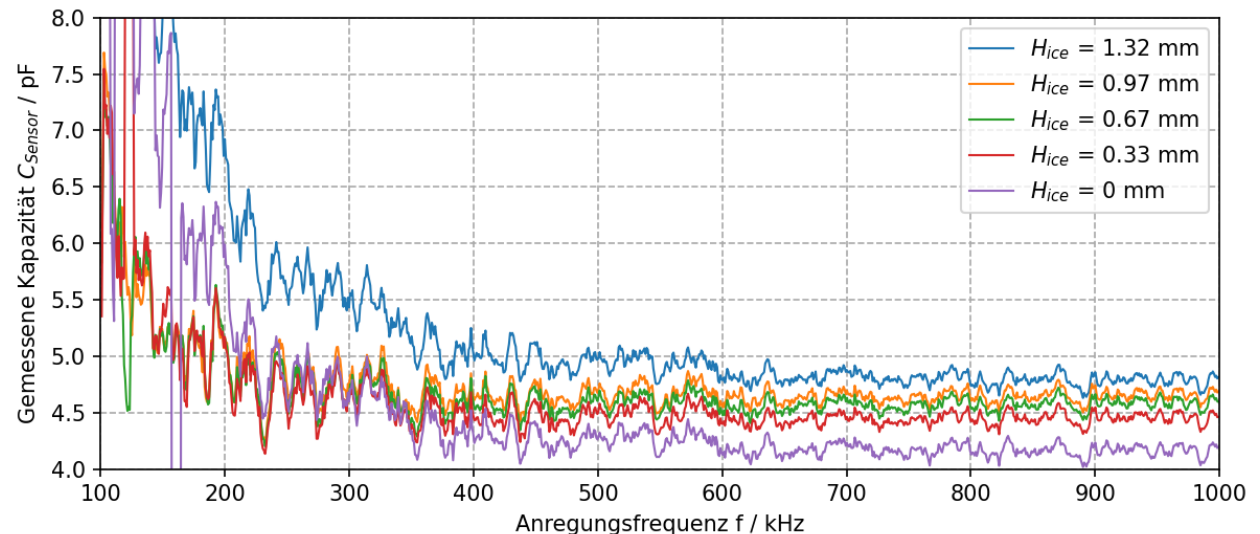
- Speicherung:
 - Netzwerkanalysator-Messwerte
 - Sensortemperatur
 - Zeitpunkt in der Messreihe
 - Höhenprofile
- Live-Anzeige:
 - Durchschn. Sensorkapazität
 - Sensortemperatur
 - Zeitpunkt in der Messreihe

Wide sensor capacitance & height measurement
($C_{avg} = 14.91$ pF, $H_{ice} = 5.65 \pm 0.17$ mm)

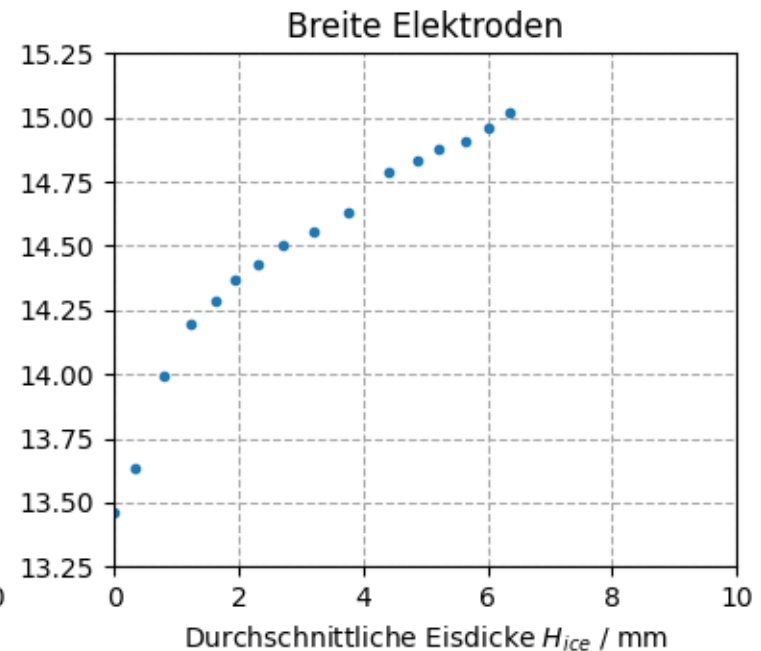
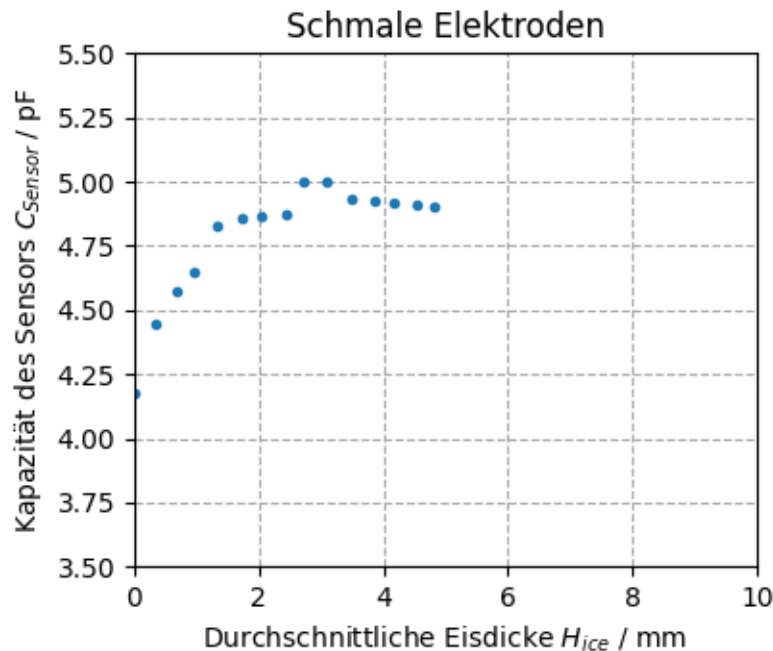


Frequenzverhalten des Sensors

- Sinkende Kapazität mit steigender Frequenz
- Stärkeres Rauschen im unteren Frequenzbereich durch Messdauer
- Kapazitätswert aus Mittelwert der Werte zwischen 400 kHz und 1 MHz

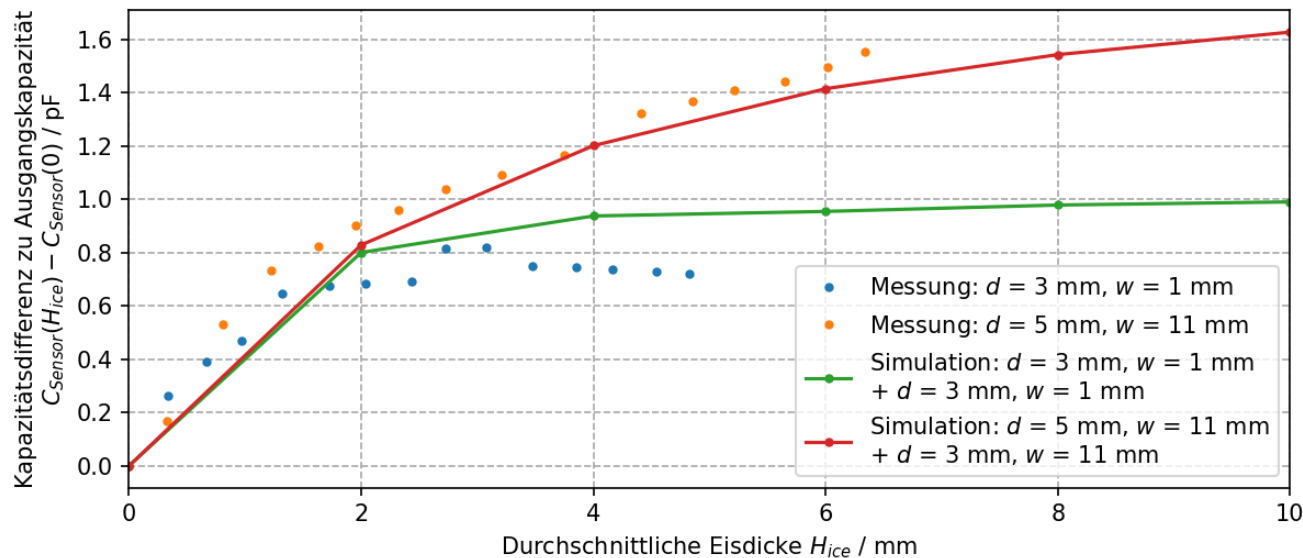
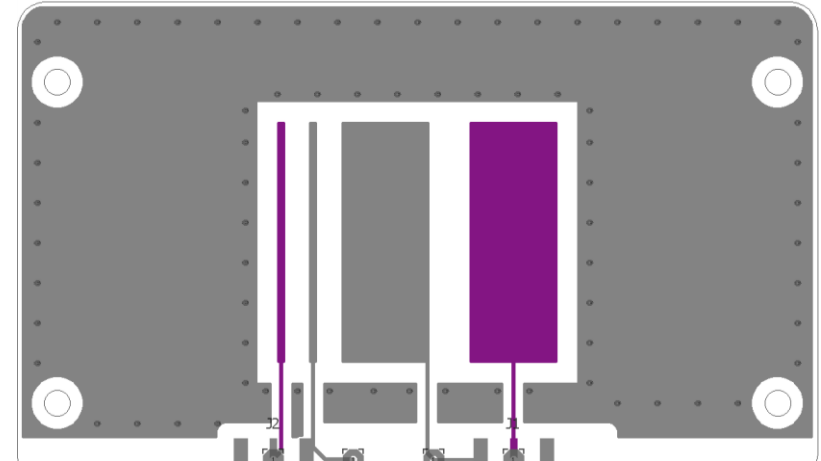


- Erhöhte Grundkapazität durch Anschluss des Netzwerkanalysators
- Schmale Elektrode in Sättigung nach 1 mm Eis



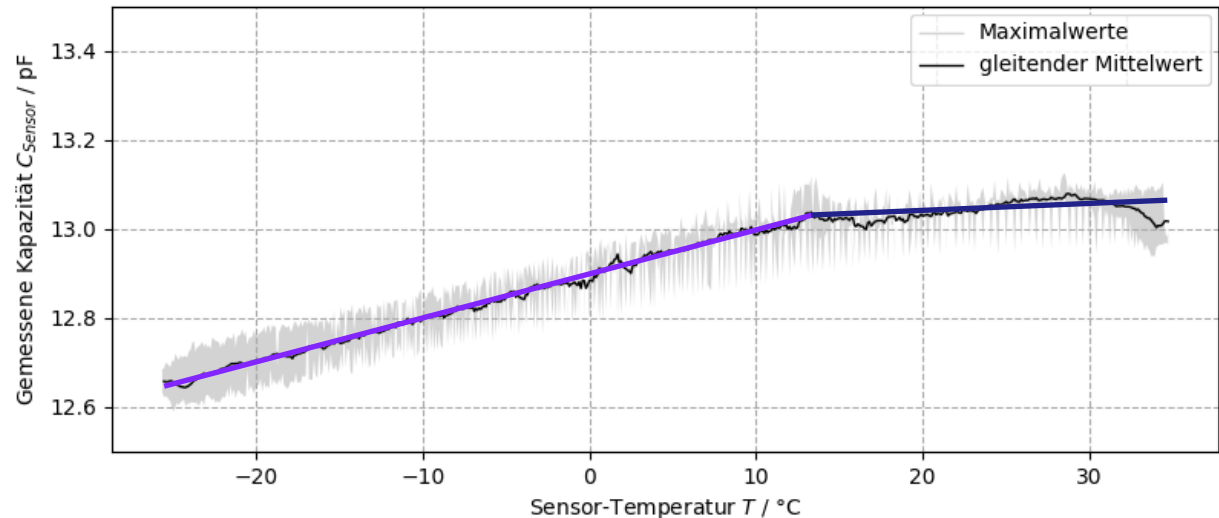
Vergleich von Messwerten zu Simulation

- Anpassung der Simulation zur Berücksichtigung der Masseflächen
- Messwerte zeigen den gleichen Trend wie die Simulation



Temperaturverhalten des Sensors

- Messung des Sensors im Klimaschrank, Zyklen zwischen -25 °C und $+35\text{ °C}$
- Umgebungstemperatur im Labor $\theta_{Ambient} = 23\text{ °C}$
- relative Luftfeuchte $RH = 50\%$
- entspricht $RH = 100\%$ bei $\theta = 13\text{ °C}$



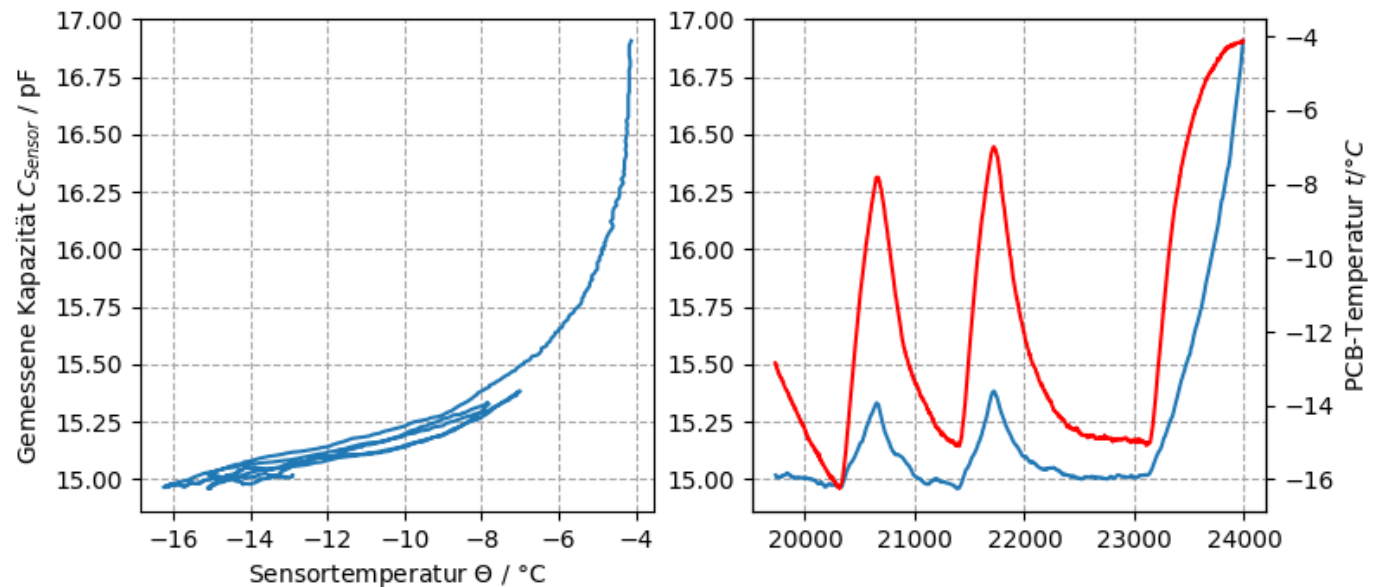
- Die Elektrodenpaare zeigen eine Empfindlichkeit für kleine Eisschichten $< 1 \text{ mm}$ von $\frac{\Delta C}{\Delta H_{ice}} = 0.5 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}$ für die kleinen Elektroden und $\frac{\Delta C}{\Delta H_{ice}} = 0.7 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}$ für die großen.
- Bei Eisschichten über 2 mm sind die kleinen Elektroden gesättigt, während die großen Elektroden auch hier noch eine Empfindlichkeit um $\frac{\Delta C}{\Delta H_{ice}} = 0.1 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}$ zeigen.

- Messung des Temperaturverhaltens unter kontrollierter Luftfeuchte
- Erweiterung des Teststands um Temperaturregelung
 - Detailliertere Charakterisierung des Verhaltens bei Eisbildung und versch. Temperaturen
- Produktion des Sensors auf dünnem, flexiblen Leiterplattenmaterial

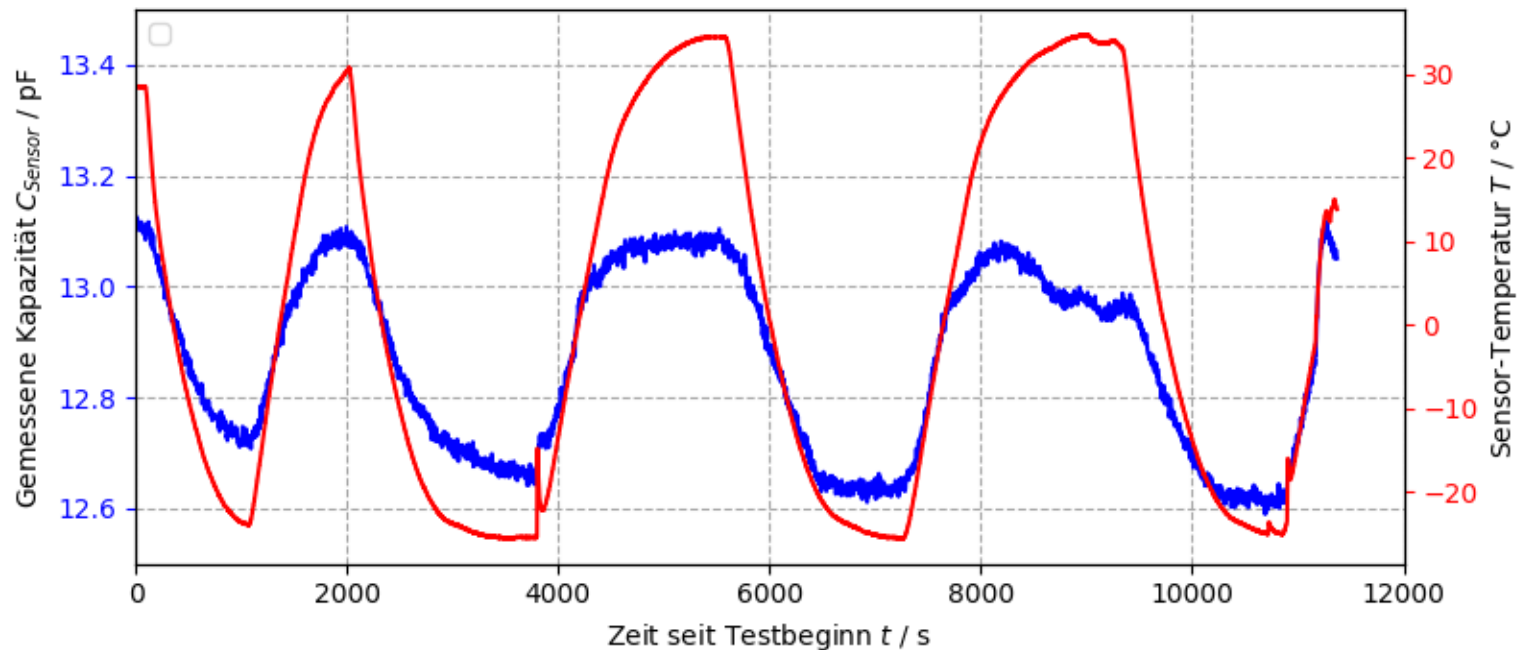
- (Fakoerde et al) doi: 10.1016/j.rser.2016.06.080
Ice protection systems for wind turbines in cold climate:
characteristics, comparisons and analysis
- (Energiforsk)
Airborne de-icing solutions for wind turbines REPORT 2016:300
- (George Xydis et al) doi: 10.3390/challe6020188
Wind turbine waste heat recovery—A short-term heat loss forecasting approach
- (Kexiang Wei et al) doi: 10.1002/we.2427
A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine

Backup #1: Temperaturverhalten mit Eis

- Temperatur erreicht durch Ein- und Auschalten des Peltier-Elements
- Anschmelzen der oberen Eisschicht

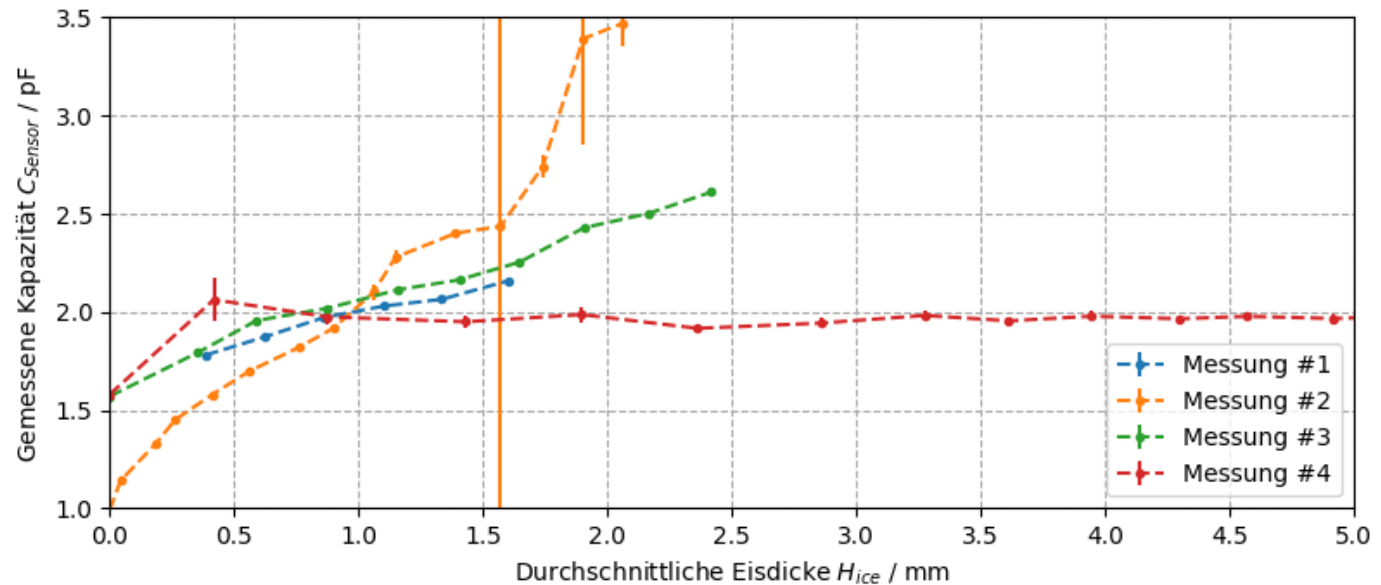


Backup #2: Temperaturverhalten ohne Eis



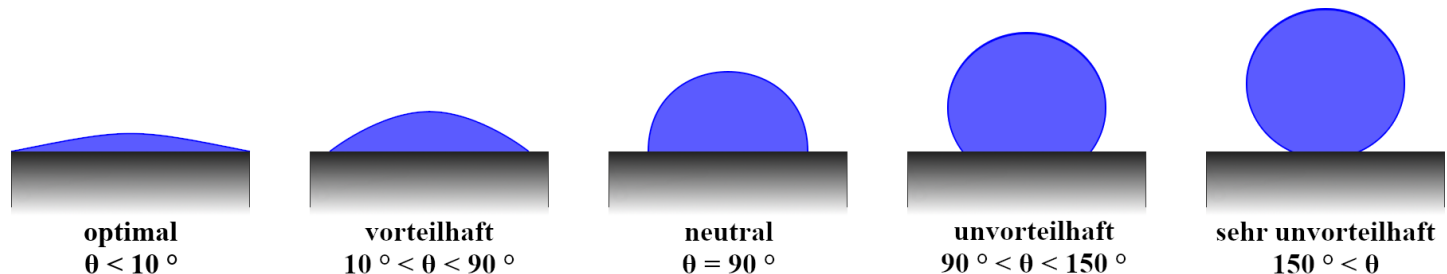
Backup #3: LCR-Messungen

- Messung 2: Signifikante Veränderung durch verschieben der Messleitungen
- Messung 1&3: Eisbildung an den Klemmen des LCR-Meters
- Messung 4: Entfernung von Feuchtigkeit und Eis von den Klemmen



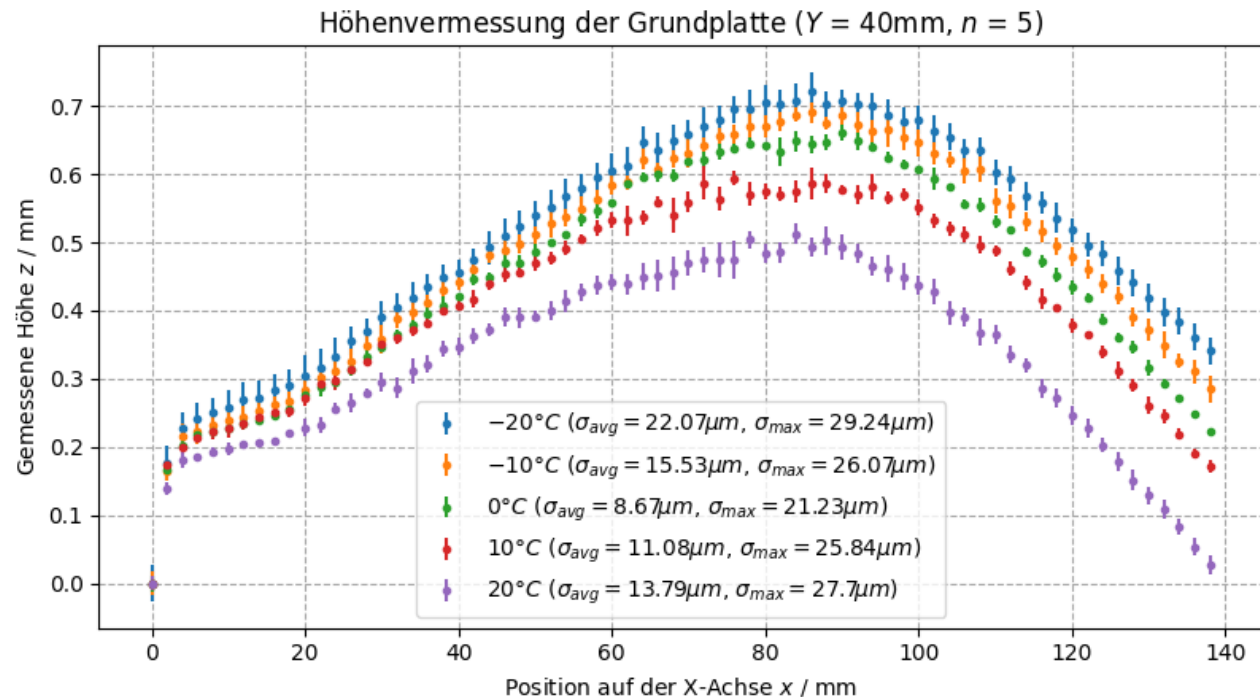
Backup #4: Oberflächenenergie

- Der Benetzungswinkel θ
- Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ_L
- der Oberflächenenergie des Körpers σ_B
- Grenzflächenenergie zwischen den beiden Komponenten σ_{LB}
- $\cos \theta = \frac{\sigma_B - \sigma_{LB}}{\sigma_L}$



Backup #5: Höhenprofildetektion

- Standardabweichung pro Messpunkt: max. 29,24 μm
- Da Temperatur konstantgehalten wird, keine Einflüsse durch Ausdehnung/Kontraktion



Mehr Zeichenfläche



NOCH mehr Zeichenfläche

