

# Entwicklung eines bionischen Infrarotsensors: Evaluation von Materialparametern und Sensorkonzepten

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Thilo Manuel Kahl

aus

Köln

Bonn, März 2015

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Gutachter: PD Dr. Helmut Schmitz

2. Gutachter: Prof. Dr. Gerhard von der Emde

Tag der Promotion: 23.06.2015

Erscheinungsjahr: 2015

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
Summary	XI
Zusammenfassung	1
<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Grundlagen der IR-Sensorik . . . . .	4
1.1.1. Was ist IR-Strahlung? . . . . .	4
1.1.2. Formeln zur Charakterisierung von IR-Strahlung . . . . .	6
1.1.3. Formeln zur Charakterisierung von IR-Sensoren . . . . .	7
1.1.4. IR-Absorption, ein Überblick . . . . .	9
1.2. IR-Sensorik: Stand des Wissens . . . . .	11
1.2.1. IR-Rezeptoren im Tierreich . . . . .	11
1.2.1.1. Photomechanische IR-Rezeptoren . . . . .	12
1.2.1.2. Bolometerartige IR-Rezeptoren . . . . .	19
1.2.2. Technische IR-Sensoren . . . . .	23
1.2.2.1. Thermische Detektoren . . . . .	25
1.2.2.2. Photonendetektoren . . . . .	29
1.3. Das bionische Modell . . . . .	30
1.4. Zielsetzung . . . . .	31
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>33</b>
2.1. Im FZ caesar hergestellter Sensorprototyp . . . . .	33
2.1.1. Aufbau Sensorprototyp FZ caesar . . . . .	33
2.1.2. Messprotokoll für die Messungen mit dem Sensorprototypen aus dem FZ caesar . . . . .	35
2.2. Eigener Prototyp . . . . .	36
2.2.1. Aufbau des Sensors . . . . .	36
2.2.1.1. Aufbau des Sensors mit einer Sensorbasis ohne Ventil	37
2.2.1.2. Aufbau des Sensors mit einem integrierten Ventil . .	38

2.2.1.3.	Aufbau der für die Sensoren genutzten absorbierenden/IR-transmittierenden Einheiten . . .	42
2.2.2.	Methoden . . . . .	44
2.2.2.1.	Der Versuchsaufbau . . . . .	44
2.2.2.2.	Signaldigitalisierung, Datenaufnahme und -auswertung	44
2.2.2.3.	Befüllung des Sensors . . . . .	45
2.2.2.4.	Beschichtung der Absorber . . . . .	47
2.2.2.5.	Messung der Absorber- und Basisausdehnung . . . .	49
2.2.2.6.	Messen der Absorberrtemperatur . . . . .	49
2.2.2.7.	Berechnen der Absorberrwärmung durch IR-Absorption . . . . .	50
2.2.2.8.	Simulation und Berechnung der maximalen Gesamt- ausdehnung des Sensors . . . . .	50
2.2.2.9.	Test auf Eignung der Sensorfluide . . . . .	52
2.2.2.10.	Aufbau spezielle Golayzelle . . . . .	53
2.2.2.11.	Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{htc}$ .	54
2.3.	Materialauswahl und -eigenschaften . . . . .	56
<b>3.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>59</b>
3.1.	Evaluation der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eines Sensors ohne Ventil . . . . .	59
3.1.1.	Ergebnisse . . . . .	59
3.1.2.	Bewertung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eines Sensors ohne Ventil . . . . .	60
3.2.	Evaluation von verschiedenen Ausleseeinheiten . . . . .	61
3.2.1.	Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Prototyp aus dem FZ caesar . . . . .	61
3.2.1.1.	Messungen mit Luft als Sensorfüllung . . . . .	62
3.2.1.2.	Sensorkonfiguration mit abgedecktem Fenster . . . .	64
3.2.1.3.	Messungen mit Wasser als Sensorfüllung . . . . .	66
3.2.1.4.	Bewertung der Reproduzierbarkeit des Prototypen aus dem FZ caesar . . . . .	68
3.2.2.	Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Elektret- Mikrofon als Ausleseeinheit . . . . .	69
3.2.2.1.	Ergebnisse . . . . .	69
3.2.2.2.	Bewertung der Reproduzierbarkeit des Sensors mit Elektret-Mikrofon-Ausleseeinheit . . . . .	70
3.2.3.	Reproduzierbarkeit der Messungen eines mit Wegaufnehmer versehene Sensors . . . . .	73
3.2.3.1.	Reproduzierbarkeit der Daten nach dem Wechsel der Membran . . . . .	73

3.2.3.2.	Reproduzierbarkeit der Messwerte nach dem neuen Befüllen . . . . .	75
3.2.3.3.	Reproduzierbarkeit der Daten ohne Änderungen der Sensorkonfiguration . . . . .	77
3.2.3.4.	Einfluss einer Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils auf die Messergebnisse . . . . .	78
3.2.3.5.	Einfluss von Luftblasen im Sensor auf Messerergebnisse	80
3.2.3.6.	Bewertung der Reproduzierbarkeit des Sensors mit kapazitivem Wegaufnehmer aus Ausleseeinheit . . . .	81
3.2.4.	Fazit aus den Experimenten zur Auswahl der Ausleseeinheiten	82
3.3.	Evaluation von verschiedenen Absorbern . . . . .	84
3.3.1.	Vergleich von verschiedenen Absorbern . . . . .	84
3.3.1.1.	Ergebnisse . . . . .	85
3.3.1.2.	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	85
3.3.2.	Beschichtung der Absorber . . . . .	87
3.3.2.1.	Einfluss der Beschichtungsdicke . . . . .	88
3.3.2.2.	Vergleich zwischen beschichtet und unbeschichtet . .	89
3.3.3.	Messung der Absorber- und Basisausdehnung . . . . .	92
3.3.3.1.	Ergebnisse . . . . .	92
3.3.3.2.	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	92
3.3.4.	Berechnung der Erwärmung der Absorber . . . . .	94
3.3.4.1.	Ergebnisse . . . . .	94
3.3.4.2.	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	95
3.3.5.	Einfluss der Schichtdicke verschiedener Absorber auf die Wärmeverteilung . . . . .	95
3.3.5.1.	PVC . . . . .	96
3.3.5.2.	PEEK-HPV . . . . .	98
3.3.5.3.	Kupfer . . . . .	101
3.3.5.4.	Polyethylen (PE) . . . . .	104
3.3.5.5.	FullCure720 . . . . .	105
3.3.5.6.	IR-transmissives Fenster . . . . .	109
3.3.6.	Einfluss von verschiedenen Materialparametern auf die Wärmeverteilung im Absorber anhand von PEEK-HPV, Simulation	112
3.3.7.	Fazit aus den Experimenten mit verschiedenen Absorbern . . .	115
3.4.	Evaluation von verschiedenen Fluiden . . . . .	117
3.4.1.	Test auf Eignung als Sensorfluid . . . . .	117
3.4.1.1.	Test auf Eignung von Novec7100 als Sensorfluid . . .	118
3.4.1.2.	Test auf Eignung eines 50% Glycerol-Wasser-Gemisches (GWG-50%) als Sensorfluid . . . . .	119

## Inhaltsverzeichnis

---

3.4.1.3.	Test auf Eignung von destilliertem Wasser als Sensorfluid . . . . .	119
3.4.1.4.	Test auf Eignung von Silikonöl B10 als Sensorfluid . . . . .	119
3.4.1.5.	Test auf Eignung von Luft als Sensorfluid . . . . .	120
3.4.1.6.	Bewertung der Eignung der getesteten Fluide als Sensorfluid . . . . .	120
3.4.2.	Einfluss verschiedener Fluide auf die Sensorantwort . . . . .	121
3.4.2.1.	Vergleich der Fluide in einem Sensor mit PEEK-HPV-Absorber . . . . .	121
3.4.3.	Vergleich der Fluide in einem Sensor mit IR-transmissivem Fenster . . . . .	124
3.4.3.1.	Ergebnisse . . . . .	125
3.4.3.2.	Bewertung der verschiedenen Sensorfluide bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters . . . . .	126
3.4.4.	Nachbau einer einfachen Golayzelle . . . . .	128
3.4.4.1.	Ergebnisse . . . . .	128
3.4.4.2.	Bewertung der verschiedenen Golayzellenkonfigurationen . . . . .	130
3.4.5.	Fazit aus den Versuchen mit verschiedenen Sensorfluiden . . . . .	131
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>135</b>
4.1.	Diskussion des technischen Sensors anhand seiner einzelnen Komponenten . . . . .	135
4.2.	Optimierungspotential des technischen Sensors . . . . .	142
4.3.	Was kann man daraus für das biologische Modell ableiten? . . . . .	143
4.4.	Ausblick . . . . .	146
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
	<b>A. Anhang: Tabellen</b>	<b>XXIII</b>
	<b>B. Anhang: Datenblätter</b>	<b>XXVII</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>XXXIII</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Spektrale Ausstrahlung und Wiensches Verschiebungsgesetz . . . . .	6
1.2.	Transmission von IR-Strahlung durch die Atmosphäre . . . . .	10
1.3.	Schematische Zeichnung eines Querschnitts durch ein <i>Melanophila</i> - Sensillum . . . . .	14
1.4.	Vergleich der $D^*$ -Werte verschiedener verfügbarer Sensoren . . . . .	25
1.5.	Schematische Darstellung des Übertrags des biologischen Modells auf einen technischen Prototypen . . . . .	30
2.1.	Schematische Darstellung des Sensorprototyps aus dem FZ caesar . . . . .	34
2.2.	Schematische Abbildung des Sensors ohne Ventil . . . . .	37
2.3.	Schematische Darstellung des Sensors mit integriertem Ventil und kapazitivem Wegaufnehmer als Ausleseeinheit . . . . .	39
2.4.	Schematische Darstellung des Sensors mit Absorber, Sensorbasis mit Ventil und einem Elektret-Mikrofon als Ausleseeinheit . . . . .	41
2.5.	Schematische Darstellung eines Querschnitts durch die Befüllkammer . . . . .	46
2.6.	Schematische Skizze des Simulationsmodells . . . . .	51
3.1.	Messergebnisse des Sensors aus dem FZ caesar mit Luftfüllung . . . . .	62
3.2.	FFT-Analysen der Messungen des luftgefüllten Sensors aus dem FZ caesar . . . . .	63
3.3.	FFT-Analysen der Messungen des luftgefüllten FZ-caesar-Sensors mit abgedecktem Fenster . . . . .	65
3.4.	Messergebnisse des Sensors aus dem FZ caesar mit Wasserfüllung . . . . .	67
3.5.	FFT-Analysen für die Messwiederholungsreihen des FZ-caesar- Sensors mit Wasserfüllung . . . . .	68
3.6.	Abbildung der gemittelten Sensorantworten der Messungen mit sechs verschiedenen Membranen bei einer Chopperfrequenz von $1 - 15 \text{ Hz}$ . . . . .	72
3.7.	Boxplot der Messergebnisse des Sensors mit 10 neu eingesetzten Mem- branen . . . . .	74
3.8.	Boxplot der Messergebnisse mit einem achtmal neu befüllten Sensor . . . . .	76
3.9.	Boxplot der Messergebnisse mit einem wassergefüllten Sensor für Ex- positionsfrequenzen von $1 - 15 \text{ Hz}$ . . . . .	78

## Abbildungsverzeichnis

---

3.10. Einfluss einer Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils auf die Messergebnisse . . . . .	79
3.11. Einfluss von Luftblasen auf die Messergebnisse . . . . .	81
3.12. Vergleich der Sensorantworten bei Nutzung von 13 verschiedenen Absorb- ern aus sieben verschiedenen Materialien . . . . .	87
3.13. Vergleich der Sensorantwort eines 1 <i>mm</i> Kupferabsorbers mit ver- schiedenem Grafitdickendicken . . . . .	89
3.14. Vergleich von Absorber- und Basisausdehnung . . . . .	93
3.15. Boxplot der Sensorantworten aus Messungen mit 0.4 <i>mm</i> , 0.2 <i>mm</i> und 0.12 <i>mm</i> dicken PVC-Absorb-ern . . . . .	97
3.16. Boxplot der Sensorantworten bei 1 <i>mm</i> , 0.5 <i>mm</i> und 0.2 <i>mm</i> dicken PEEK-HPV-Absorb-ern mit Wasserfüllung . . . . .	100
3.17. Boxplot der Sensorantworten der Messungen mit 1 <i>mm</i> , 0.5 <i>mm</i> und 0.2 <i>mm</i> dicken Kupferabsorb-ern . . . . .	102
3.18. Boxplot der Sensorantworten bei 1 <i>mm</i> und 0.5 <i>mm</i> starken PE- Absorb-ern mit Wasserfüllung . . . . .	105
3.19. Boxplot der Sensorantworten bei 1 <i>mm</i> , 0.5 <i>mm</i> und 0.12 <i>mm</i> dicken FullCure720-Absorb-ern mit Wasserfüllung . . . . .	107
3.20. Simulation der Gesamtausdehnung in Abhängigkeit verschiedener Ma- terialeigenschaften von PEEK-HPV . . . . .	114
3.21. Vergleich verschiedener Fluide gemessen mit 1 <i>mm</i> , 0.5 <i>mm</i> und 0.2 <i>mm</i> dicken PEEK-HPV-Absorb-ern . . . . .	122
3.22. Vergleich der Sensorantworten mit verschiedenen Fluiden als Sensor- füllung bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters . . . . .	125
3.23. Boxplot der Sensorantworten bei verschiedenen Konfigurationen des Sensors als Golayzelle . . . . .	129
4.1. Überblick über alle für diese Dissertation entwickelten Sensorprototypen	137
B.1. Datenblatt Dichte FullCure720 . . . . .	XXVIII
B.2. Datenblatt thermische Ausdehnung FullCure720 . . . . .	XXIX
B.3. Datenblatt Wärmeleitfähigkeit FullCure720 . . . . .	XXX
B.4. Datenblatt KPCM G60H15C33-44DB-1176 . . . . .	XXXI



# Tabellenverzeichnis

1.1.	Einteilung von IR im elektromagnetischen Spektrum . . . . .	5
1.2.	Maximale Absorption von einigen Bindungen und Wasser . . . . .	9
1.3.	Materialwerte für die Exokutikula und die Mesokutikula des IR-Sensillums . . . . .	16
2.1.	Membranmaterialien der Elektret-Mikrofon-Versuche . . . . .	42
2.2.	Verwendete Absorbermaterialien . . . . .	43
2.3.	Liste der genutzten Sensorfluide mit Herstellerangabe . . . . .	47
2.4.	Materialwerte für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{htc}$ . . . . .	56
2.5.	Begründung für die Verwendung der genutzten Materialien . . . . .	57
2.6.	Tabelle der thermomechanischen Eigenschaften der in den Versuchen genutzten Flüssigkeiten und Materialien . . . . .	58
3.1.	Messergebnisse des Sensors mit Sensorbasis ohne Ventil . . . . .	60
3.2.	Gemitteltetes SNR und Empfindlichkeit von acht Messungen mit einem neu befüllten Sensor . . . . .	75
3.3.	Kriterienkatalog zur Auswahl der Ausleseinheit . . . . .	83
3.4.	Kruskal-Wallis-Analysen der Sensorantworten bei Nutzung eines 1 mm Kupferabsorbers mit verschiedenen Grafitbeschichtungsdicken . . . . .	88
3.5.	Mittlere Veränderung der Antwortamplituden (Amp) und deren Va- rianz (Var) nach Auf- bzw. Einbringen einer zusätzlichen Absorber- schicht bei verschiedenen Absorbermaterialien . . . . .	90
3.6.	Berechnete Erwärmung eines 1 mm dicken Absorbers aus verschiede- nen Materialien bei einem Wärmeenergieeintrag von 0.023 J . . . . .	95
3.7.	Simulation der Wärmeverteilung im Absorber bei verschiedenen PVC- Schichtdicken . . . . .	98
3.8.	Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus PEEK-HPV . . . . .	99
3.9.	Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus Kupfer . . . . .	103
3.10.	Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus PE . . . . .	106

## Tabellenverzeichnis

---

3.11. Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus FullCure720 . . . . .	108
3.12. Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters aus Herasil . . . . .	110
3.13. Kriterienkatalog zur Auswahl eines geeigneten Absorbers . . . . .	115
3.14. Rauschspannung, Empfindlichkeit und Noise-Equivalent-Power des besten Absorbers je getestetem Material . . . . .	116
3.15. Rauschspannung, Empfindlichkeit und Noise-Equivalent-Power des Sensors mit 0.2 mm dickem PEEK-HPV-Absorber mit verschiedenen Fluiden . . . . .	123
3.16. Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{htc}$ . . . . .	123
3.17. Rauschspannung, Empfindlichkeit und Noise-Equivalent-Power des Sensors mit IR-transmissivem Fenster mit verschiedenen Fluiden . . .	126
3.18. Gemittelte $U_r$ , SNR und $NEP''$ des Sensors als Golayzelle in verschiedenen Golayzellen-Konfigurationen . . . . .	130
3.19. Kriterienkatalog zur Auswahl eines geeigneten Sensorfluids . . . . .	132
4.1. Kriterienkatalog zur Auswahl der einzelnen Sensorelemente . . . . .	139
A.1. Auflistung der Perioden- und Expositionsdauer für die Frequenzen von 1 – 15 Hz . . . . .	XXIII
A.2. Gemittelte Amplituden und Varianzen für 6 verschiedene Membrane mit Elektret-Mikrofon-Ausleseinheit . . . . .	XXIV
A.3. Mediane, Mittelwerte, Varianzen und prozentuale Varianzen der Messergebnisse mit 13 verschiedenen Absorbern . . . . .	XXV

# Summary

The metathorax of the Black Fire Beetle *Melanophila acuminata* houses one pair of infrared (IR) pit organs with around 70 single infrared sensitive sensilla per organ. Each of these miniaturized dome shaped sensilla is built of a hard exocuticular shell and a microfluidic core consisting of spongy mesocuticle.

In the lower area of the core a small fluid filled chamber is placed, that is innervated by a dendrite of a highly sensitive mechanoreceptor. Absorption of IR-radiation causes the whole sensilla to heat up, leading to an expansion of all the above described components. Due to the different thermal expansion coefficients of the materials, the expansion of the core is much higher than the expansion of the shell, causing a pressure increase in the core. This pressure deflects the terminal region of the dendrite in the fluid chamber which leads to the generation of action potentials. With this photomechanic principle the beetle is able to transform absorbed IR-radiation into a fast micromechanical event that is recorded by the mechanoreceptor.

In this thesis the model of the IR-sensitive photomechanic sensilla was transferred to prototypes of biomimetic IR-sensors. These sensors were used to evaluate the applicability of different absorber materials and fluids. Each of these prototype sensors consisted of a fluidic pressure chamber, an absorber or IR-transmissive window and a deflectable membrane, whose deflection was measured.

Within this thesis, thermomechanical properties of the used absorbers and fluids that have a major impact on the strength of the membrane deflection and therefore on the strength of the sensor signal were identified .

Among these parameters the thermal expansion coefficient and the heat transfer coefficient have the highest impact on the signal strength. Additionally, two scenarios could be established that represent the complex heat transfer in the sensor as well as in the biological model. Depending on the use of solid and fluidic absorbers, there is a considerable difference in the effect of these parameters on the membrane deflection.



# Zusammenfassung

Der schwarze Kiefernprachtkäfer *Melanophila acuminata* besitzt zwei paarig angeordnete infrarotsensitive Grubenorgane mit jeweils etwa 70 miniaturisierten IR-Sensillen.

Jede dieser Sensillen bestehen aus einer komplex aufgebauten kutikulären Kugel, die aus einem äußeren exokutikulären Mantel und einem von mikrofluidischen Kanälen durchzogenen mesokutikulären Kern besteht.

In eine mit Flüssigkeit gefüllte Kammer im unteren Bereich des Kerns ragt die Dendritenspitze eines mechanosensitiven Neurons. Eine Absorption einfallender IR-Strahlung führt zu einer Temperaturänderung der gesamten Kugel, die in einer thermischen Ausdehnung des Kerns und des darin enthaltenen Fluids resultiert. Durch diese Ausdehnung kommt es zu einer Druckerhöhung in der fluidgefüllten Kammer, die zu einer Membranauslenkung der terminalen Dendritenregion führt. Mithilfe dieses sogenannten photomechanischen Prinzips ist *M. acuminata* in der Lage absorbierte IR-Strahlung in ein schnelles mikromechanisches Ereignis umzuwandeln, das mit einem empfindlichen Mechanorezeptor registriert wird.

Es wurden nach diesem biologischen Vorbild aufgebaute bionische Sensorprototypen entwickelt, anhand derer eine Evaluation verschiedener Absorber- und Sensorfluidmaterialien durchgeführt wurde. Die Prototypen bestanden jeweils aus einer fluidgefüllten Druckkammer, einem Absorber bzw. infrarotdurchlässigen Fenster und einer Membran, deren Auslenkung ausgelesen wurde.

Im Rahmen der Arbeit konnten thermomechanische Materialparameter der Absorbermaterialien und der als Füllung verwendeten Fluide ermittelt werden, die einen besonders großen Einfluss auf die Stärke der Membranauslenkung, und damit auch auf die Stärke des Sensorsignals haben. So hat neben dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten auch der Wärmeübergangskoeffizient einen entscheidenden Einfluss auf die Signalstärke. Zudem konnten zwei Szenarien etabliert werden, die die komplexen Wärmeübergänge sowohl im biologischen Vorbild als auch im bionischen Sensor abbilden. In Abhängigkeit von der Verwendung eines Feststoffabsorbers oder eines Fluids als Absorptionsmedium unterschied sich der Einfluss der verschiedenen thermomechanischen Parameter deutlich voneinander.



# Kapitel 1.

## Einleitung

Der schwarze Kiefernprachtkäfer *Melanophila acuminata* hat ein sehr sensitives thermisches Infrarotdetektionssystem (IR-Detektionssystem) entwickelt, das es ihm ermöglicht, IR-Intensitäten von  $0.6 \text{ W/m}^2$  (Evans, 1966) und vielleicht sogar Intensitäten von nur  $4.1 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$  (Schmitz and Bousack, 2012) zu detektieren. Der Käfer nutzt dieses System wahrscheinlich, um Waldbrände über große Entfernungen zu orten und anzufliegen. Auf den frischen Brandflächen wird die Paarung vollzogen (Linsley, 1943) und die Eier werden in das tote Holz gelegt, in dem sich die Larven entwickeln.

Da der Rezeptor mit einer möglichen Sensitivität von  $4.1 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$  in einem Bereich zwischen den Empfindlichkeiten von ungekühlten (zum Beispiel  $1 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$ , U3600  $VO_x$  Mikrobolometer, DRS Technologies) und gekühlten Sensorsystemen (zum Beispiel  $3.3 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ , P3257-10 MCT Sensor gekühlt auf  $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ , Hamamatsu) liegt, ist er ein interessantes Vorbild für die Entwicklung eines neuen, technischen, IR-Sensors.

Mithilfe eines technischen Sensors, der nach dem gleichen Prinzip wie das Sensillum von *Melanophila* funktioniert, können in einem Reverse-Bionik-Ansatz durch die Variation von verschiedenen Materialparametern Rückschlüsse auf das biologische Vorbild und die Funktionen der einzelnen Komponenten der Infrarotsensillen des Käfers gezogen werden. Dieser Ansatz ermöglicht es, offene Fragen bezüglich der Funktionsweise der Sensillen auf Basis der gewonnen Erkenntnisse neu zu diskutieren und die bisherige Theorie neu zu bewerten.

Der Käfer hat einige spezielle Anpassungen seiner IR-sensitiven Sensillen entwickelt, die es ihm wahrscheinlich ermöglichen, Waldbrände über große Entfernungen detektieren zu können. Diese Anpassungen werden detailliert in den folgenden Abschnitten beschrieben. Zudem werden weitere IR-sensitive Systeme aus der Natur und der Technik vorgestellt, um die IR-sensitiven Sensillen des Käfers besser in die Gesamtheit der bisher bekannten IR-detektierenden Systeme einordnen zu können. Hierfür soll zunächst ein kurzer Überblick über die physikalischen und technischen Grund-

lagen gegeben werden, mit deren Hilfe die Strahlung und die technischen Sensoren spezifiziert werden können.

### 1.1. Grundlagen der IR-Sensorik

Bevor auf die Eigenschaften der unterschiedlichen existierenden natürlichen und technischen Infrarotdetektoren eingegangen wird, sollen hier zunächst wichtige Grundlagen zur Infrarotstrahlung, der Bestimmung verschiedener Sensorparameter sowie der Absorption von Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) erläutert werden.

#### 1.1.1. Was ist IR-Strahlung?

Infrarotstrahlung ist elektromagnetische Strahlung in einem Spektrum von  $\lambda = 0.7 \mu m$  bis  $\lambda = 1 mm$  Wellenlänge (Dereniak and Boreman, 1996). Sie liegt somit zwischen dem für uns sichtbaren Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 380 - 700 nm$  und der Mikrowellenstrahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1 - 1000 mm$ .

Jeder Körper über dem absoluten Nullpunkt von  $0 K$  strahlt Infrarotstrahlung ab; allerdings mit unterschiedlichen Intensitäten und Wellenlängen. Der Definition nach am besten können dies sogenannte schwarze Körper. Ein schwarzer Körper ist ein theoretisches Konstrukt, das jede elektromagnetische Strahlung vollständig, also ohne Transmissions- oder Reflexionseffekte, absorbiert. Da nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz die Absorption und die Emission immer im Gleichgewicht stehen, ist ein schwarzer Körper nicht nur ein perfekter Absorber, sondern auch ein perfekter Strahler. Wenn ein schwarzer Körper als Emittter betrachtet wird, wird er auch **schwarzer Strahler** oder Schwarzkörperstrahler genannt. Der Emissionsgrad oder die Emissivität ( $\epsilon$ ) eines schwarzen Strahlers ist gleich 1. Für reale Körper wird der Emissionsgrad immer in Relation zum perfekten schwarzen Strahler angegeben und ist somit immer  $< 1$  (Dereniak and Boreman, 1996). Diese Strahler werden auch als graue Körper bzw. graue Strahler bezeichnet.

Die Infrarotstrahlung wird üblicherweise nach der Wellenlänge in vier weitere Bereiche unterteilt, das nahe, mittlere, ferne und ultraferne Infrarot (Budzier and Gerlach, 2010) (siehe Tabelle 1.1). Von dem sehr breiten IR-Spektrum ist für die klassische Infrarotsensorik der Bereich von  $3 \mu m$  bis etwa  $12 \mu m$  (Vincent, 1990) von besonderer Bedeutung. In dieser Bandbreite des Spektrums liegen sowohl Hochtemperaturereignisse, wie man sie beispielsweise in industriellen Anlagen findet, als auch sehr niedrige Temperaturen ( $-30 ^\circ C$ ), wie sie noch in der von Menschen bewohnten Umwelt vorkommen. Die tiefste jemals gemessene Temperatur von  $-89.2 ^\circ C$ , gemessen

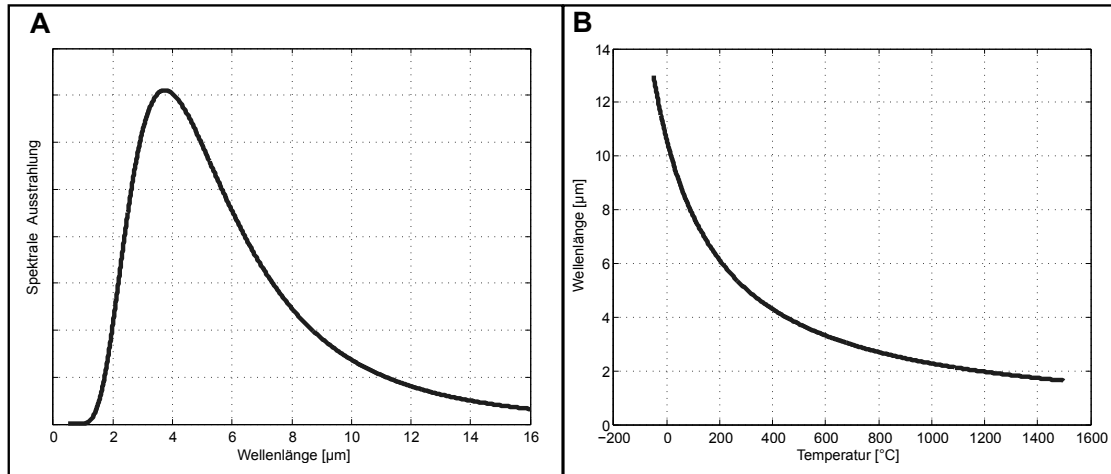


am 21. Juli 1983 an der Vostok-Forschungsstation in der Antarktis (World Meteorological Organization, 2014), liegt zwar deutlich tiefer, aber auch Temperaturen außerhalb der oben genannten Bandbreite sind noch messbar, wenn auch mit einer deutlich geringeren Sensitivität als bei Temperaturen innerhalb dieser Bandbreite. Der Grund hierfür ist, dass bei einer bestimmten Temperatur nicht nur eine einzige Wellenlänge abgestrahlt wird, sondern ein ganzes Spektrum (siehe Abbildung 1.1A). Ganz allgemein gilt, dass jeder Körper über dem absoluten Nullpunkt von  $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $0\text{ K}$ ) Infrarotstrahlung emittiert (Dereniak and Boreman, 1996). Die Kenngröße  $\lambda_{max}$  gibt für jede Temperatur die Wellenlänge mit der höchsten abgestrahlten Energiedichte an. Abbildung 1.1B zeigt  $\lambda_{max}$  für die Temperaturen von  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tabelle 1.1.:** Einteilung von Infrarot im elektromagnetischen Spektrum sowie Angabe der entsprechenden Wellenzahl und des Temperaturbereiches, wenn die Wellenlänge  $\lambda_{max}$  entspricht.

Bereich	Kürzel	Wellenlänge $\lambda[\mu\text{m}]$	Wellenzahl $\sigma[\text{cm}^{-1}]$	Temp. bei $\lambda = \lambda_{max}$ [K]
nahes IR	NIR	0.7 - 3	14.29 - 3.33	4139.7 - 965.9
mittleres IR	MIR	3 - 6	3.33 - 1.67	965.9 - 483
fernes IR	FIR	6 - 40	1.67 - 250	483 - 72.4
ultrafernes IR	UFIR	40 - 1000	250 - 10	72.4 - 2.9

Innerhalb der technisch interessanten Bandbreite von  $3\text{ }\mu\text{m}$  bis etwa  $12\text{ }\mu\text{m}$  kann die IR-Strahlung je nach Wellenlänge fast gar nicht oder auch besonders gut über weitere Entfernungen gemessen werden. Dieser Umstand liegt an der Zusammensetzung der Atmosphäre, in der es neben Wasserdampf auch Gase wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gibt, die die IR-Strahlung stark absorbieren. Dies führt zu zwei **atmosphärischen Fenstern**, in denen die IR-Strahlung ohne große Absorptionsverluste über weite Strecken messbar ist. Diese Fenster liegen im Bereich zwischen  $3 - 5\text{ }\mu\text{m}$  und zwischen  $8 - 12\text{ }\mu\text{m}$  (Vincent, 1990). Um optimale Messergebnisse zu erhalten, sollte bei einem IR-Sensor die maximale Empfindlichkeit bei dem  $\lambda_{max}$  der Temperatur des gemessenen Objekts liegen. Das  $\lambda_{max}$  wiederum sollte innerhalb eines der IR-transmissiven Fenster liegen. Besonders gekühlte Photonendetektoren zeigen eine starke Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Wellenlänge. Bei thermischen IR-Detektoren wird durch eine sehr breitbandig absorbierende Absorberschicht die Wellenlängenabhängigkeit meist auf eines der atmosphärischen Fenster optimiert. Näheres zur Absorption von IR-Strahlung ist in Abschnitt 1.1.4 zu finden, ein kleiner Überblick über Photonen- und thermische IR-Detektoren in Abschnitt 1.2.2.



**Abbildung 1.1.:** Spektrale Ausstrahlung und Wiensches Verschiebungsgesetz; A) Spektrale Ausstrahlung für 500 °C berechnet mit dem Planckschen Strahlungsgesetz; B)  $\lambda_{max}$  für einen Temperaturbereich von -50 bis 1500 °C, berechnet mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz.

## 1.1.2. Formeln zur Charakterisierung von IR-Strahlung

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben handelt es sich bei IR-Strahlung um Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 0,7 μm bis 1 mm. Die Wellenlänge elektromagnetischer Strahlung berechnet sich aus der Lichtgeschwindigkeit  $c$  in [m/s] und der Frequenz in [1/s] mit der das Photon schwingt.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1.1}$$

Für das infrarote Spektrum wird die Wellenlänge  $\lambda$  in [μm] angegeben. Eine weitere häufig genutzte Angabe zur Charakterisierung der IR-Strahlung ist eine Angabe der Wellenzahl  $\tilde{\nu}$  [cm<sup>-1</sup>]. Sie ist nichts anderes als  $1/\lambda \cdot 10^4$ .

Um die Intensität der Strahlung für eine definierte Bandbreite und eine beliebige Temperatur für einen Raumwinkel  $sr$  berechnen zu können, wird das **Plancksche Strahlungsgesetz** genutzt (siehe Gleichung 1.2). Eine grafische Darstellung der spektralen Ausstrahlung ( $M_{\lambda S}$ ) über eine Bandbreite von 0,7 μm bis 16 μm ist in Abbildung 1.1A zu finden.

$$M_{\lambda S} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda \cdot T)} - 1)} d\lambda \tag{1.2}$$

$C_1 = h \cdot c^2$ ;  $C_2 = h \cdot \frac{c}{k_b}$ ;  $h$  = Plancksches Wirkungsquantum;  $k_b$  = Boltzmannkonstante;  $c$  = Lichtgeschwindigkeit;  $T$  = Strahlertemperatur [K], die Einheit ist  $[W/m^2 \cdot sr]$ .

Zur Berechnung der Gesamtenergie, integriert über alle Wellenlängen, kann das einfachere zu berechnende **Stefan-Boltzmann-Gesetz** genutzt werden (Gleichung 1.3), die SI-Einheit ist  $[W/m^2]$ :

$$M_S = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.3)$$

$\epsilon$  = Emission des Strahlers;  $\sigma$  = Stefan-Boltzmann-Konstante  $[\frac{W}{m^2 K^4}]$ ;  $T$  = Strahlertemperatur [K].

Mithilfe des **Wienschen Verschiebungsgesetzes** (Gleichung 1.4) kann die Wellenlänge ( $\lambda_{max}$ ) mit der maximalen spektralen Strahldichte für jede beliebige Strahlertemperatur (T) berechnet werden. Die Einheit ist  $[\mu m]$ .

$$\lambda_{max} = \frac{2897.8 [\mu m \cdot K]}{T [K]} \quad (1.4)$$

### 1.1.3. Formeln zur Charakterisierung von IR-Sensoren

Um einen IR-Sensor zu charakterisieren und seine Güte zu bestimmen, werden verschiedene Parameter des Sensors ermittelt. Welche Parameter dies sind und was sie bedeuten, soll im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Das Signal-Rausch-Verhältnis, auch **Signal-to-Noise-Ratio (SNR)** genannt, wird durch Gleichung 1.5 bestimmt. Es ist eine dimensionslose Größe, die, wie der Name bereits sagt, das Verhältnis des gemessenen Sensorsignals zum gemessenen Gesamt-Rauschen angibt. Je größer der Wert, desto deutlicher ist das Signal detektierbar.

$$SNR = \frac{\text{Signalamplitude}}{\text{Rauschamplitude}} \quad (1.5)$$

Die **Empfindlichkeit** (Responsivity) ist das Verhältnis von Sensoroutput zu IR-Input. Der IR-Input berechnet sich aus der Sensorfläche multipliziert mit der einfallenden Leistung in  $[W/cm^2]$ .

$$\mathfrak{R} = \frac{\text{Sensor Output [V]}}{\text{IR-Input [W]}} = \frac{U_S}{E_{eff}} \quad (1.6)$$

## Kapitel 1. Einleitung

---

Die Einheit der Empfindlichkeit ist  $[V/W]$ . Wird das Signal nicht über eine Spannungsänderung, sondern über eine Kapazitätsänderung generiert (gemessen in Farad (F)), ist die Einheit nicht  $[V/W]$  sondern dementsprechend  $[F/W]$ .

Die **Noise-Equivalent-Power (NEP)** gibt die Strahlungsintensität an, bei der der Sensor ein Signal-to-Noise-Ratio von 1 erreicht. Je kleiner die NEP, desto weniger Leistung wird benötigt, bis ein SNR von 1 erreicht ist. Je kleiner die NEP desto besser ist demnach der Sensor. Die NEP lässt sich durch Gleichung 1.7 berechnen. Die Einheit ist  $[W]$ .

$$NEP = \frac{\text{Rauschen [V]}}{\text{Empfindlichkeit [V/W]}} = \frac{U_R}{\mathfrak{R}} \quad (1.7)$$

Die NEP lässt sich auch für Flächen berechnen. Hierbei ist  $NEP'' = NEP \cdot \frac{1}{\text{Sensorfläche}}$ , die Einheit ist  $[W/m^2]$ .

Um die kleinste messbare Temperaturdifferenz anzugeben (Temperaturauflösung) wird die **Noise-Equivalent-Temperatur-Difference (NETD)** genutzt. Wie der Name schon sagt, gibt sie an, bei welcher Temperatur eines zu messenden Objekts die NEP des Sensors gleich 1 ist (siehe Gleichung 1.8). Üblicherweise wird dieser Wert als Maß für die Güte eines bildgebenden IR-Kamerasystems verwendet. Die Einheit ist  $[K]$ .

$$NETD = \frac{\text{Rauschen [V]}}{\text{Sensor Output [V]}} \cdot \text{Temp.-änderung [K]} = \frac{U_R}{U_S} \cdot \Delta T \quad (1.8)$$

Die Sensorgröße hat einen großen Einfluss auf die oben genannten Parameter, unterscheidet sich jedoch häufig deutlich bei unterschiedlichen Sensoren. Dies ist ein Problem bei der Vergleichbarkeit von verschiedenen Sensoren. Soll die Güte des Sensors objektiv vergleichbar sein, muss ein Vergleichswert geschaffen werden, bei dem die Sensorgröße nicht mehr als maßgebende Größe in das Ergebnis eingeht. Dieser Vergleichswert ist die **spezifische Detektivität ( $D^*$ )**. In die Berechnung der spezifischen Detektivität (siehe Gleichung 1.9) geht, neben der Empfindlichkeit des Sensors, auch die Wurzel der Sensorfläche und die normierte Rauschspannung des Systems ein. Der  $D^*$ -Wert wird meist angegeben, um Einzelelement-Sensoren zu charakterisieren. Die Einheit ist  $[cm \cdot Hz^{1/2}/W]$ .

$$D^* = \frac{\text{Empfindlichkeit [V/W]} \cdot \sqrt{(\text{Sensorfläche [cm}^2\text{)})}}{(\text{normierte Rauschspannung [V}/\sqrt{Hz}\text{]})} = \frac{\mathfrak{R} \cdot \sqrt{(A_{\text{Sensor}})}}{U_{Rn}} \quad (1.9)$$

### 1.1.4. IR-Absorption, ein Überblick

Anders als bei einer Absorption von Ultraviolettstrahlung (UV-Strahlung), bei deren Absorption die Elektronen des Absorbers auf ein höheres Energieniveau gehoben werden, kommt es bei einer Absorption von Infrarotstrahlung zu Schwingungen von Atomen im Absorber. Damit ein Molekül IR-Strahlung absorbieren kann, benötigt es also einen elektrischen Dipol, entlang dessen Bindung zwischen den beiden Polen es zu einer wiederkehrenden Streckung und Verkürzung oder Biegung, oder anders gesagt, einer Oszillation, kommen kann. An diese Oszillation können die auftretenden schwingenden IR-Photonen ankoppeln und so die Energie an das Molekül abgeben. Ein heteronukleares Molekül, also ein Molekül aus mindestens zwei verschiedenen Elementen mit elektrischem Dipol, ist zwingende Voraussetzung damit es überhaupt zu einer Oszillation der Bindungen und somit zu einer Absorption von Strahlung kommen kann. Bei größeren Molekülen absorbieren die unterschiedlichen funktionellen Gruppen unterschiedliche Bänder des Infrarotspektrums (Hesse et al., 2005; Silverstein and Bassler, 1963; Stuart, 2005).

Für den biologischen Sensor von *Melanophila acuminata* sind, aufgrund des Aufbaus aus Kutikula und vermutlich wässrigen Verbindungen im Inneren des Sensillum, die Absorptionsspektren von Wasser und organischen Verbindungen wie  $C - H$ ,  $C - O$ ,  $N - H$  von besonderer Bedeutung. Die Kutikula besteht neben Chitin auch aus einer Vielzahl von Proteinen, Lipiden und Wasser. Durch die große Variabilität der spezifischen Zusammensetzung der Kutikula kann es nicht nur zu einer großen Varianz der mechanischen Eigenschaften kommen, sondern auch zu einer Veränderung der Absorptionsspektren (vgl. Abschnitt 1.2.1.1.1).

**Tabelle 1.2.:** Maximale Absorption  $\zeta_{max}$  von einigen Bindungen und Wasser (vgl. Werte aus Silverstein and Bassler (1963)) im Bereich von  $2 - 5 \mu m$

Verbindung	$\zeta_{max}$
$H_2O$	$2.95 \mu m$
$C - H$	$3.49 \mu m$
$C - O$	$5 - 6 \mu m$
$N - H$	$2.86 - 3.14 \mu m$

In Tabelle 1.2 sind die Wellenlängen mit maximaler Absorption der oben genannten Bindungen exemplarisch in einer - wahrscheinlich für den Käfer relevanten - Bandbreite von  $2 - 5 \mu m$  angegeben. Auffällig ist, dass bis auf Kohlenmonoxid ( $C - O$ ), alle aufgeführten Verbindungen im Bereich von  $2.2 \mu m$  bis  $3.7 \mu m$  absorbieren und somit das Spektrum abdecken, das von Vollfeuern emittiert wird, bei denen sowohl

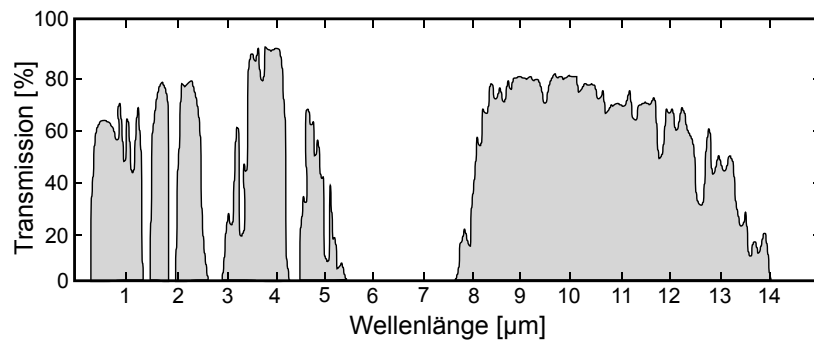
## Kapitel 1. Einleitung

---

die Bodenvegetation als auch die Baumkronen brennen (Temperatur  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Schmitz and Bleckmann, 1998)). Da der Grad der Absorption immer in Abhängigkeit einer gegebenen Schichtdicke des Materials gemessen wird, muss diese immer beachtet werden. So können auch Absorbermaterialien mit einer geringen Absorption bei einer hohen Schichtdicke die Strahlung vollständig absorbieren.

Auch viele andere Materialien, wie solche, die in technischen IR-Sensoren genutzt werden, absorbieren in der Bandbreite von  $3 - 5\ \mu\text{m}$ . Eine kleine Auswahl wurde in Lang et al. (1992) diskutiert. Hierzu gehören Metalldünnschichten, poröses Platin-Schwarz und poröses Gold-Schwarz, jeweils in sehr dünnen Schichtdicken von wenigen  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ . Besonders das poröse Gold-Schwarz hat sehr hohe Absorptionswerte und kann sogar, wenn es in der richtigen Schichtdicke aufgetragen wird ( $\lambda/2$ ), in der Bandbreite des nahen- und mittleren Infrarot die Strahlung vollständig absorbieren (Lang et al., 1992; Sintsov, 1966).

In Abbildung 1.2 ist die **Transmission** der IR-Strahlung in der Atmosphäre angegeben. Transmission bezeichnet das Hindurchtreten der Strahlung durch ein Medium und gehört zu den vier elementaren „Interaktionsmöglichkeiten“ von Strahlung mit einem Medium. Die drei weiteren sind die bereits bekannte Absorption und Reflexion sowie die Brechung.



**Abbildung 1.2.:** Transmission von IR-Strahlung durch die Atmosphäre für die Wellenlängen von  $1 - 15\ \mu\text{m}$ . Verändert nach Naval Air Warfare Center (1997). Die transmittierten Wellenlängen sind in grau dargestellt.

Die beiden für die IR-Sensorik interessanten atmosphärischen Fenster von  $3 - 5\ \mu\text{m}$  und  $8 - 12\ \mu\text{m}$  sind deutlich zu erkennen. In den Bereichen von  $2.9\ \mu\text{m}$ ,  $4.3\ \mu\text{m}$  und  $14 - 15\ \mu\text{m}$  überwiegt eine Absorption von  $\text{CO}_2$ , während im Bereich von  $5 - 8\ \mu\text{m}$  eine starke Absorption von Wasserdampf überwiegt und eine Transmission von IR-Strahlung über weite Strecken unterbindet (Naval Air Warfare Center, 1997). Auch

andere Bestandteile der Luft, wie beispielsweise Kohlenmonoxid ( $CO$ ), tragen zu einer starken Absorption bei.

## 1.2. IR-Sensorik: Stand des Wissens

### 1.2.1. IR-Rezeptoren im Tierreich

Die Wahrnehmung von IR-Strahlung ist sowohl für Spezies mit also auch ohne speziell zur Wahrnehmung von IR-Strahlung modifizierten Sinneszellen beschrieben. Von einigen Raubwanzen (*Reduviidae*) ist beispielsweise bekannt, dass sie mithilfe von extrem sensitiven Thermosensoren in den Antennen IR-Strahlung wahrnehmen können (Schmitz et al., 2000c).

Gegenüber der Wahrnehmung von IR-Strahlung mittels gewöhnlicher Thermosensoren in den Antennen hat sich bei einigen Spezies die Fähigkeit entwickelt, Infrarotstrahlung mithilfe anderer Sinnesstrukturen wahrnehmen zu können. Diese finden sich sowohl unter den Insekten als auch den Wirbeltieren.

Unter den Insekten ist die Fähigkeit IR-Strahlung mithilfe von speziell modifizierten Sensillen wahrzunehmen in den Käfergattungen *Acanthocnemus*, *Merimna* und *Melanophila* sowie für einige Arten von Rindenwanzen (*Aradidae*) aus der Gattung *Aradus* beschrieben.

Bei den Wirbeltieren findet sich diese Fähigkeit bei einigen Schlangen (*Crotalinae* (Bullock and Diecke, 1956), *Boidae*, *Pythonidae* (Barrett et al., 1970a)) sowie bei der Vampirfledermaus *Desmodus rotundus* (Kishida et al., 1984; Kürten and Schmidt, 1982).

Im Folgenden sollen die Morphologie und Funktionsweise der speziell an die IR-Wahrnehmung angepassten Rezeptoren und Sensillen der oben genannten Insekten, Schlangen und Vampirfledermäuse erläutert werden. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die IR-sensitiven Sensillen von *Melanophila acuminata* gelegt, da diese als Vorbild für den in dieser Dissertation untersuchten bionischen Sensor dienen.

Die IR-Rezeptoren gliedern sich aufgrund der unterschiedlichen Funktionsprinzipien in zwei Typen; in bolometerartige IR-Rezeptoren, bei denen Temperaturrezeptoren eine Erwärmung des Rezeptors wahrnehmen, und in photomechanische IR-Rezeptoren, bei denen der Effekt der thermischen Ausdehnung genutzt wird, um die Erwärmung des Rezeptors mithilfe von Mechanorezeptoren wahrzunehmen.

### 1.2.1.1. Photomechanische IR-Rezeptoren

Die Fähigkeit, IR-Strahlung mithilfe von photomechanischen IR-Rezeptoren wahrzunehmen, ist bisher nur für wenige Vertreter der Insekten bekannt und beschränkt sich vermutlich auf nur zwei Gattungen in zwei verschiedenen Ordnungen. Die am Besten untersuchte Gattung ist die Gattung *Melanophila* aus der Ordnung der Käfer (Coleoptera). Die zweite Gattung, *Aradus* aus der Ordnung der Schnabelkerfen (Hemiptera) beziehungsweise der Unterordnung der Wanzen (Heteroptera), ist bisher nur wenig untersucht.

#### 1.2.1.1.1. Photomechanische Infrarotrezeptoren bei *Melanophila acuminata*

Käfer der Gattung *Melanophila* zeigen ein ausgeprägtes pyrophiles („feuerliebendes“) Verhalten und fliegen Waldbrände an (Linsley, 1943), um sich dort zu paaren und ihre Eier dann in das frisch verbrannte Holz zu legen. Die Gattung *Melanophila* beinhaltet 13 rezente Arten (Bellamy, 2008), von denen alle ein pyrophiles Verhalten zeigen.

Die verbrannten Bäume auf den Waldbrandflächen zeigen, anders als lebendige Bäume, keine Abwehrfunktionen mehr (Apel, 1988, 1989, 1991; Graham, 1939), wodurch sich die Larven von *Melanophila* dort entwickeln und vom Phloem und Holz ernähren können. Zudem ist der Konkurrenzdruck durch andere Larven im Holz nach dem Feuer zunächst reduziert (Wikars, 1997), was eine Entwicklung der Larven von *Melanophila* begünstigt.

Zur Detektion der Waldbrände werden vom Käfer wahrscheinlich sowohl optische, olfaktorische als auch infrarote Reize genutzt. So sind Rauchfahnen von Waldbränden bei klarem Wetter über viele Kilometer sichtbar und auch olfaktorisch wahrnehmbar.

*Melanophila* kann sehr gut Guajakol (2-Methoxyphenol) mit den Chemosensoren in den Antennen wahrnehmen (Schütz et al., 1999). Guajakol-Derivate entstehen unter anderem beim unvollständigen Verbrennen von Lignin (Sagebiel and Seiber, 1993), also auch in großer Menge bei Waldbränden. Berechnungen lassen darauf schließen, dass *Melanophila* bei leichtem Wind in der Lage ist, einen einzelnen schwelenden Baum auf eine Entfernung von 1 km wahrzunehmen (Schütz et al., 1999). Hierfür ist der Käfer jedoch darauf angewiesen, dass der Wind die Rauchdämpfe in seine Richtung transportiert.

Da die olfaktorischen Markerstoffe nur in einer schmalen Rauchfahne transportiert werden, sind sie nicht immer für *Melanophila* nutzbar. Im Gegensatz zu den optischen oder olfaktorischen Reizen hat eine Wahrnehmung von Infrarotreizen den Vorteil, auch bei schlechter Sicht und unabhängig von den Windverhältnissen über



weite Entfernungen zu funktionieren. Wie eine beispielhafte Auflistung zeigt, sortiert nach dem Datum der Veröffentlichung, sind für die maximale Entfernung, über die *Melanophila* Wandbrände wahrnehmen können soll, sehr verschiedene Werte veröffentlicht.

- 80 km (Van Dyke, 1926)
- 20 km (Linsley, 1943)
- 12 km (Schmitz and Bleckmann, 1998)
- 50 km (Gronenberg and Schmitz, 1999)
- 1 km (Hammer et al., 2001)
- < 0.05 km (Evans, 2010)
- 120 km (Schmitz and Bousack, 2012)

Die aufgelisteten Werte stammen teils aus Beobachtungen, aus Berechnungen auf Basis der in Verhaltens- und elektrophysiologischen Versuchen ermittelten Sensitivität und aus Simulationen.

*Melanophila acuminata* hat eine recht große Flügelfläche und eine stark ausgeprägte Flugmuskulatur, die ihn zu einem starken und schnellen Flieger macht, der auch entgegen der Windrichtung in der Lage sein sollte einen Waldbrand aus größeren Entfernungen schnell anzufliegen (Wikars, 1997).

Elektrophysiologische sowie Verhaltensexperimente (Schmitz et al., 2000a, Evans, 1966) haben gezeigt, dass der Käfer am stärksten auf Infrarotreize mit einer Wellenlänge von etwa 3 – 3.5  $\mu\text{m}$  reagiert. Dies entspricht Temperaturen von etwa 550 – 700 °C (siehe Wiensches Verschiebungsgesetz, Formel 1.4) und liegt somit im Temperaturbereich eines Vollfeuers (500 – 1000 °C), bei dem Bodenvegetation und Baumkronen brennen (Schmitz and Bleckmann, 1998).

### Die Morphologie des IR-Organs

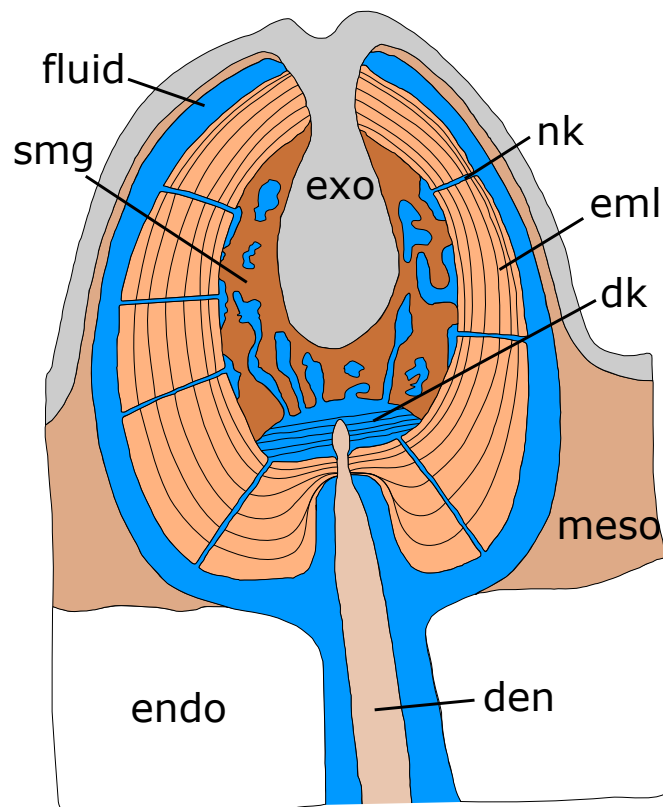
Die infrarotsensitiven Sensillen, mit denen *Melanophila* die IR-Strahlung wahrnehmen kann, liegen in zwei Grubenorganen, die lateral am Metathorax, direkt hinter den Coxae des zweiten Beinpaares liegen. Diese Grubenorgane sind zwischen 170 – 320  $\mu\text{m}$  lang, 80 – 150  $\mu\text{m}$  breit, 70 – 100  $\mu\text{m}$  tief (Schmitz and Bleckmann, 1997) und am Boden unpigmentiert. Zudem sind sie mit feinen Wachsfilamenten ausgefüllt (Evans, 1964), die bei *Melanophila acuminata* aus direkt neben den infrarotsensitiven Sensillen liegenden Wachsdrüsen sekretiert werden.

Die Anzahl dieser kuppelförmigen infrarotsensitiven Sensillen variiert je nach Größe des Tieres, liegt jedoch üblicherweise zwischen 70 und 100 Sensillen je Grubenorgan (Evans, 1964). Die Sensillen haben einen Durchmesser von etwa 14 – 20  $\mu\text{m}$  (Evans, 1964; Schmitz and Bleckmann, 1997).

## Kapitel 1. Einleitung

---

Jedes einzelne Sensillum besteht aus einem harten Mantel aus eng geschichteter Exokutikula, der von einem Flüssigkeitsreservoir umgeben ist (siehe Abbildung 1.3). Innerhalb dieses Mantels liegt ein schwammartiger Kern aus Mesokutikula, der von Mikrolakunen und feinen Kanälen durchzogen ist. Durch die vielen Kanäle und Lakunen im Kern des Sensillums kommt es zu einer enormen Oberflächenvergrößerung der Kontaktfläche zwischen Kutikula und Fluid (Schmitz et al., 2007). Durch eine 3-D-Rekonstruktion eines IR-Sensillums konnte eine Kontaktfläche von  $972 \mu\text{m}^2$  ermittelt werden (Klocke, 2012).



**Abbildung 1.3.:** Schematische Zeichnung eines Querschnitts durch ein *Melanophila*-Sensillum. fl = Fluid, smg = schwammartiges mesokutikuläres Gewebe, eml = exokutikulärer Mantel, exo = Exokutikula, meso = Mesokutikula, endo = Endokutikula, nk = Nanokanal, dk = Druckkammer, den = Dendrit der mechanosensitiven Sinneszelle. Modifiziert nach Schmitz et al. (2007).

Das Flüssigkeitsreservoir außerhalb des Mantels ist durch feine Nanokanäle im Mantel mit dem Fluid im Kern verbunden (Schmitz et al., 2007). Im unteren Teil des

Kerns wird durch einen flüssigkeitsgefüllten Bereich, in den ein mechanosensitiver Dendrit eines modifizierten Haarmechanorezeptors (Schmitz et al., 2007; Vondran et al., 1995) hineinragt, eine Druckkammer gebildet. Von oben ragt stiel förmig ein Auswuchs der kuppelförmigen äußeren Kutikula durch den Mantel bis in den schwammartigen Kern hinein (Schmitz and Bleckmann, 1997).

### **Signaltransduktion - Das photomechanische Prinzip**

Das photomechanische Prinzip von *Melanophila* wurde erstmals in Schmitz and Bleckmann (1998) beschrieben. Erwärmt sich das Sensillum durch die Absorption von IR-Strahlung, dehnen sich alle Komponenten gemäß ihres thermischen Ausdehnungskoeffizienten aus.

Da sich das Fluid und der mesokutikuläre Kern im Inneren des harten, exokutikulären Mantels aufgrund der größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten stärker ausdehnen als der Mantel selbst (siehe Tabelle 1.3), wird die weiche Spitze des mechanosensitiven Dendriten in der Druckkammer komprimiert. Die daraus resultierende Auslenkung der Dendritenmembran führt zur Reizung der mechanosensitiven Zelle und bei ausreichender Reizintensität zur Generierung des Signals in Form von Aktionspotentialen. Die Nanokanäle im harten Mantel des Sensillums dienen möglicherweise als Bandpassfilter und sorgen dafür, dass niederfrequente Ausdehnungsereignisse gepuffert werden und keine Aktionspotentiale auslösen (Schmitz et al., 2007; Siebke et al., 2014b). Diese niederfrequenten Ausdehnungsereignisse können beispielsweise durch langsame Änderungen der Temperatur durch tageszeitliche Schwankungen entstehen. Der Mechanorezeptor, der die Druckkammer des Sensillums innerviert, ist höchst wahrscheinlich extrem sensitiv. Für Arthropoden-Haarsensoren ist beschrieben, dass Membranauslenkungen im Bereich von  $0.1\text{ nm}$  ausreichen, um die Nervenzellen überschwellig zu erregen (Barth et al., 2004; Thurm, 1982).

### **Mechanische und thermische Eigenschaften der Kutikula**

Die Exo- und die Mesokutikula des Sensillums unterscheiden sich in ihren mechanischen Eigenschaften deutlich von der umgebenden Kutikula, was auf eine spezielle Anpassung an die Funktionsweise des IR-Sensillums hindeutet (Klocke and Schmitz, 2012). Der exokutikuläre Mantel des Sensillums ist etwa 50% härter und etwa 20% steifer als die das Sensillum umgebende Exokutikula. Die Mesokutikula im Kern ist dagegen rund 80% weicher und rund 90% nachgiebiger als die das Sensillum umgebende Mesokutikula. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 1.3 aufgetragen.

Durch einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang zwischen E-Modul und thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Arenz, 2005) lässt sich vermuten, dass sich der weiche Kern des Sensillums deutlich stärker ausdehnt als der harte Mantel. Da Fluide in der Regel einen größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als

## Kapitel 1. Einleitung

---

Feststoffe haben, ist davon auszugehen, dass sich auch das Fluid im Kern stärker ausdehnt als der Mantel. Aus den in Tabelle 1.3 aufgeführten Werten für das E-Modul lässt sich nach Arenz (2005) eine grobe Aussage über die Größe des thermischen Ausdehnungskoeffizienten treffen. So zeigt sich, dass die Mesokutikula einen deutlich größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die Exokutikula und wahrscheinlich sogar einen ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie Wasser hat. Für die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit

**Tabelle 1.3.:** Materialwerte für die Exokutikula und die Mesokutikula des IR-Sensillum.  $c_p$  = Wärmekapazität;  $\kappa$  = Wärmeleitfähigkeit;  $\alpha$  = thermischer Ausdehnungskoeffizient. Mit Exo = Exokutikula, Meso = Mesokutikula  
 (1) (Klocke and Schmitz, 2012); (2) Berechnet nach (Oliver and Pharr, 1992) mit Daten aus (1); (3) (Müller, 2009); (4) Berechnet nach (Arenz, 2005); (5) (Vincent and Wegst, 2004); (6) (Fabritius et al., 2009)

	Sensillum Exo	Sensillum Meso
Härte [GPa]	0.26 (1)	0.03 (1)
Reduziertes E-Modul [GPa]	4.8 (1)	0.5 (1)
E-Modul [GPa]	4.3 (2)	0.45 (2)
$c_p$ [kJ/Kg · K]	1.8-2.1 (3)	2.1-2.8 (3)
$\kappa$ [mW/m · K]	150-200 (3)	200-330 (3)
$\alpha$ [1/K]	4.58E-05 (4)	1.22E-04 (4)
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1.0-1.3 (5)	1.0-1.3 (5)
Poissonzahl	0.33 (6)	0.33 (6)

der Kutikula von *Melanophila* in nativem Zustand können nur grobe Annahmen getroffen werden. In Müller (2009) wurden die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit anhand des vermuteten anteiligen Wassergehalts in der Kutikula berechnet. Diese Werte sind ebenfalls in Tabelle 1.3 aufgetragen.

### Absorptionsverhalten des Grubenorgans

Das Grubenorgan von *Melanophila* absorbiert die IR-Strahlung sehr gut über weite Bereiche des technisch genutzten IR-Spektrums. Besonders hoch ist die Absorption im für die Ferndetektion von Waldbränden besonders relevanten Bereich von 3  $\mu\text{m}$  bis etwa 3.5  $\mu\text{m}$  (700 – 550 °C). Ein weiterer Bereich mit hoher Absorption liegt zwischen einer Wellenlänge von 8  $\mu\text{m}$  bis etwa 9.5  $\mu\text{m}$  (90 – 30 °C) (Sowards et al., 2001; Vondran et al., 1995).

Da das von einem Körper einer bestimmten Temperatur abgestrahlte IR-Spektrum aber nicht nur aus der Wellenlänge mit der höchsten abgestrahlten Energiedichte  $\lambda_{max}$ , sondern aus einem breiten Spektrum besteht, kann der Käfer prinzipiell auch Körper anderer Temperatur wahrnehmen (siehe Abschnitt 1.1.1). Zudem sind die

oben genannten Bandbreiten die der maximalen Absorption der Käferkutikula; die Kutikula absorbiert aber auch bei vielen anderen Wellenlängen die IR-Strahlung. Sowards et al. (2001) konnte zeigen, dass das Grubenorgan im Wellenlängenbereich von 3 bis 3.5  $\mu\text{m}$  eher eine höhere Transmission hat als die restliche untersuchte Kutikula. Auch wenn dies in den aufgenommenen IR-Spektren von Vondran et al. (1995) nicht ersichtlich ist, ließe sich dies als eine Anpassung deuten. Durch die leicht höhere Transmission könnte ein größerer Teil der Strahlung tiefer in die IR-Sensillen eindringen und dort von dem fluidischen Kern absorbiert werden, was zu einer erhöhten Temperaturzunahme führen würde. Dies würde sich demnach sogar positiv auf die Sensitivität des Sensillums auswirken.

Aufgrund fehlender Materialwerte, wie dem Brechungsindex der Sensillenkutikula, kann die Eindringtiefe der IR-Strahlung nicht genau ermittelt werden. Anhand von Vergleichen zu anderen biologischen Materialien wurde diese durch Schmitz et al. (2007) jedoch auf eine Eindringtiefe von 6  $\mu\text{m}$  geschätzt. Die Strahlung würde demnach bis in den Kern des Sensillums eindringen können.

### **Sensitivität und Antwortverhalten der IR-Sensillen**

Die Sensitivität des IR-Organs von *Melanophila* wurde schon mehrfach mit verschiedenen Methoden untersucht. Die ermittelten Sensitivitäten unterscheiden sich zum Teil deutlich voneinander.

Durch Verhaltensversuche wurde für *Melanophila* eine Sensitivität von 0.6 – 1.0  $\text{W}/\text{m}^2$  ermittelt (Evans, 1966). Hier wurde der Käfer einer Strahlung mit der oben genannten Leistung exponiert und ein Zucken der Antennen als Verhaltensantwort auf den Reiz definiert.

Die kleinste in elektrophysiologischen Experimenten gezeigte Sensitivität beträgt 50  $\text{W}/\text{m}^2$ , allerdings wurde durch eine lineare Extrapolation eine Schwellenempfindlichkeit von 5  $\text{W}/\text{m}^2$  postuliert, bei der ein einzelnes Sensillum noch mit einem Aktionspotential antworten könnte (Schmitz and Bleckmann, 1998).

Durch die Rekonstruktion eines Ölfuers, das 1925 in der Wüste von Coalinga, Kalifornien (USA), brannte, wurde anhand aller bekannten Umweltdaten und mithilfe von aufwendigen Feuermodelele eine mögliche Sensitivität von  $1.3 \cdot 10^{-4}$  -  $4.1 \cdot 10^{-5}$   $\text{W}/\text{m}^2$  berechnet (Schmitz and Bousack, 2012). Diese liegt somit bis zu einem Faktor von rund einer Millionen über der mithilfe von Elektrophysiologie ermittelten Sensitivitätsschwelle.

Das IR-sensitive Sensillum von *Melanophila* antwortet rein phasisch auf eine Reizung durch IR-Strahlung (Schmitz and Bleckmann, 1998) und es konnte in elektrophysiologischen Experimenten gezeigt werden, dass sogar eine Reizfrequenz von 600  $\text{Hz}$  (bei einer Intensität von 942  $\text{W}/\text{m}^2$ ) sichtbare Rezeptorpotentiale erzeugt (Schmitz et al., 2000a). Physiologisch relevant dürfte allerdings eine Chopperfrequenz von etwa 100  $\text{Hz}$  sein, da dies der Flügelschlagfrequenz der Käfer entspricht (Schmitz et al., 2000a, nicht publizierte Beobachtung von H. Schmitz).

Das Chopperrn, also das Unterbrechen der Bestrahlung mit einer bestimmten Frequenz, ist bei phasisch antwortenden Systemen unbedingt erforderlich, um eine Antwort auf einen kontinuierlichen Reiz zu erzeugen.

### 1.2.1.1.2. Photomechanische Infrarotrezeptoren bei *Aradus albicornis*

Von den rund 200 Arten der Gattung *Aradus* (Schmitz et al. (2010)) ist für acht Arten ein pyrophiles Verhalten beschrieben, von denen sechs Arten noch während des Brandes auf der Waldbrandfläche anzufinden sind (Wikars, 1997). Jede der acht pyrophilen Arten ernährt sich offensichtlich von schnell wachsenden Ascomyceten, die auf dem verbrannten Holz wachsen (Wikars, 1997).

Ähnlich wie bei *Melanophila* sind die IR-sensitiven Sensillen von *Aradus albicornis* kuppelförmig gebaut und haben sich wahrscheinlich ebenfalls aus Haarmechanosensoren entwickelt. Die Sensillen mit einem Durchmesser von etwa  $13 \mu\text{m}$  sitzen lateral auf dem Prothorax hinter dem ersten Beinpaar (Schmitz et al., 2008). Zudem gibt es kleinere Gruppen von zwei bis vier Sensillen hinter den Coxae des ersten und zweiten Beinpaares, die allerdings tiefer in der Kutikula sitzen (Schmitz et al., 2010).

Die Sensillen bestehen aus einem stark geschichteten exokutikulären Mantel und einem mesokutikulären, fluidischen Kern. Ein Dendrit eines ziliären Mechanorezeptors dringt von unten durch den Mantel in den Kern ein und mündet dort in einer mit Fluid gefüllten Druckkammer (Schmitz et al., 2008).

Wie bei *Melanophila* findet die Signaltransduktion wahrscheinlich mittels des photomechanischen Prinzips statt. Erwärmt sich das Sensillum durch die Absorption von IR-Strahlung, dehnt sich der mesokutikuläre Kern stärker aus als der exokutikuläre Mantel, was zu einer Kompression der Dendritenmembran und, bei ausreichender Intensität, zu Generierung von Aktionspotentialen führt (Schmitz et al., 2008).

Diese These wird auch durch die mechanischen Eigenschaften der Sensillenkutikula gestützt. Materialwissenschaftliche Untersuchungen mit einem Nanoindenter zeigen, dass der mesokutikuläre Kern mit einer Härte von  $0.08 \text{ GPa}$  und einem reduzierten E-Modul von  $1.3 \text{ GPa}$  deutlich weicher und elastischer ist als der Mantel mit einer Härte von  $1.4 \text{ GPa}$  und einem reduzierten E-Modul von  $2.8 \text{ GPa}$  (Klocke and Schmitz, 2012).

Die gemessenen Werte für das reduzierte E-Modul ergeben, nach Umrechnung zum nicht reduzierten E-Modul (Oliver and Pharr, 1992) und nach dem Zusammenhang zwischen E-Modul und thermischen Ausdehnungskoeffizienten, veröffentlicht von Arenz (2005), thermische Ausdehnungskoeffizienten von  $8.1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  für den Kern und  $5.8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  für den Mantel. Der Unterschied zwischen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist zwar deutlich kleiner als bei *Melanophila*

(siehe Tabelle 1.3), aber die postulierte Druckzunahme in der Kammer durch die Ausdehnung des Kerns sollte auch hier noch möglich sein, wenn auch deutlich schwächer als bei *Melanophila*.

Elektrophysiologische Untersuchungen zeigen bei *Aradus albicornis* eine Schwellenempfindlichkeit von  $113 \text{ W/m}^2$  bei phasischem Antwortverhalten und Antwortlatenzen zwischen  $3.4 \text{ ms}$  und  $7.5 \text{ ms}$  (bei  $5490 \text{ W/m}^2$ ) (Schmitz et al., 2008). Die elektrophysiologisch ermittelte Schwellenempfindlichkeit ist somit deutlich niedriger als bei *Melanophila* ( $50 \text{ W/m}^2$  (Schmitz and Bleckmann, 1998)). Dies lässt darauf schließen, dass *Aradus* die Fähigkeit zur IR-Wahrnehmung wahrscheinlich als eine Art Frühwarnsystem nutzt, um beim Navigieren auf den Brandflächen nicht in heißen Bereichen zu landen.

### 1.2.1.2. Bolometerartige IR-Rezeptoren

Die Fähigkeit IR-Strahlung über bolometerartige IR-Rezeptoren wahrzunehmen erstreckt sich, anders als bei den photomechanischen IR-Rezeptoren, nicht nur auf die Insekten sondern ist auch für Schlangen und für die Vampirfledermaus *Desmodus rotundus* beschrieben. Im Folgenden sollen die verschiedenen bolometerartigen IR-Rezeptoren kurz vorgestellt werden.

#### 1.2.1.2.1. Bolometerartige Infrarotrezeptoren bei *Merimna atrata*

Die in Australien endemische Art *Merimna atrata* gehört, wie auch *Melanophila*, zu den Prachtkäfern (Buprestidae) und ist der einzige Vertreter der Gattung *Merimna*. Der Käfer wird bis zu  $20 \text{ mm}$  groß und ist dafür bekannt gezielt brennende Waldbrandflächen anzufliegen (Poulton, 1915; Wikars, 1997).

Auf den Waldbrandflächen legen sie ihre Eier in das Holz der frisch verbrannten Eukalyptusbäume, in denen sich die Larven entwickeln (Schmitz et al., 2014).

Die IR-Organen von *M. atrata* liegen, anders als bei allen anderen hier beschriebenen Insekten, nicht am Thorax sondern am Abdomen. Die Organe liegen ventro-lateral auf dem zweiten und dritten, und selten auch auf dem vierten Abdominalsegment (Mainz et al., 2004; Schmitz et al., 2001). Die Organe sind leicht in die Kutikula eingesunken und bilden eine asymmetrische Grube mit einem Durchmesser von etwa  $300 - 400 \mu\text{m}$ . Auf ihrem Grund sind sie wabenförmig strukturiert und leicht gelblich gefärbt (Schmitz et al., 2000b). Die Kutikulaschichtdicke der Grube ist deutlich reduziert (Schneider and Schmitz, 2014).

Direkt unter der absorbierenden Fläche befindet sich ein Luftsack, der ein multipolares Neuron umhüllt und das IR-Organ thermisch vom restlichen Körper isoliert (Schmitz et al., 2000b). Die Dendriten dieses Neurons sind stark verzweigt,

liegen jedoch dicht beieinander und werden von Gliazellen umhüllt. Zusammen bilden sie die thermosensitive, sogenannte „terminal dendrite mass“ (TDM) (Schmitz et al., 2000b).

Neben der Innervation der IR-Organen durch das thermosensitive Neuron werden diese auch durch zwei Skolopidien innerviert. Diese fungieren üblicherweise als Streckrezeptoren und setzen am Boden der IR-Organen an. Durch ihre Lage ist zu vermuten, dass sie die Verformung der Kutikula durch eine Erwärmung messen können. Ihr Beitrag zur IR-Detektion, als eine Art photomechanische Komponente, ist jedoch noch nicht zweifelsfrei geklärt (Schneider and Schmitz, 2013, 2014).

Die Signaltransduktion der bolometerartigen IR-Rezeptorkomponente findet über eine Erwärmung des speziell angepassten Kutikulaapparats im IR-Organ und ein Messen der Temperaturänderung durch das thermosensitive Neuron statt. Die elektrophysiologisch ermittelte Sensitivität der *Merimna* IR-Organen auf Basis des Thermorezeptors liegt bei  $400 \text{ W/m}^2$  mit einer Latenz von  $47 \text{ ms}$  bei einem phasischen Antwortverhalten (Schmitz and Trenner, 2003). Für die Skolopidien sind noch keine elektrophysiologischen Messergebnisse verfügbar.

Anders als *Melanophila* und *Aradus albicornis* handelt es sich bei *Merimna atrata* also nicht um einen photomechanischen, sondern um einen bolometerartigen IR-Rezeptor (mit einer möglicherweise vorhandenen photomechanischen Komponente). Aufgrund der geringen Sensitivität werden die IR-Rezeptoren wahrscheinlich auf kurze Distanz zur Vermeidung von heißen Bereichen auf Brandflächen genutzt.

### 1.2.1.2.2. Bolometerartige Infrarotrezeptoren bei *Acanthocnemus nigricans*

Wie auch bei *Merimna atrata* ist für *Acanthocnemus nigricans* ein bolometerartiger IR-Rezeptor beschrieben (Kreiss et al., 2005; Schmitz et al., 2002). *A. nigricans* ist pyrophil und auf noch schwelenden Waldbrandflächen zu finden (Wikars, 1997), auf denen er sich vermutlich mit seinen IR-Rezeptoren orientiert (Kreiss et al., 2007). Er ist die einzige Art in der Gattung *Acanthocnemus* und mit einer Größe von nur  $3 - 6 \text{ mm}$  deutlich kleiner als *Merimna atrata* (Kreiss et al., 2005).

Die IR-Organen liegen am Prothorax, anterior des ersten prothorakalen Beinpaares. Die Organen bestehen je aus einer kleinen Sensorscheibe („Disc“) mit einem Durchmesser von  $110 - 185 \mu\text{m}$ , die lateral von einem kleinen Fortsatz über einer luftgefüllten Grube gehalten werden. Die Formen von Disc und Grube erlauben einen Luftaustausch zwischen Grube und umgebender Luft. Vermutlich ist dies eine Anpassung zur Minimierung der thermischen Masse und dient zur Isolierung der Discs gegen den Körper (Schmitz et al., 2002). In jeder dieser Discs befinden



sich etwa 90 Sensillen, die sich auf der äußeren Oberfläche im anterioren Bereich der Discs konzentrieren. Es finden sich aber auch einige Sensillen im anterioren Bereich auf der Randzone der Disc zwischen Ober- und Unterseite (Kreiss et al., 2005).

Elektrophysiologische Untersuchungen zeigen, dass *Acanthocnemus nigricans* mit diesen Discs in der Lage, ist IR-Strahlung wahrzunehmen (Kreiss et al., 2007; Schmitz et al., 2002). Die Schwellenempfindlichkeit liegt zwischen 111 und 250  $W/m^2$  bei Latenzen zwischen 20 – 40  $ms$ . Die Auflösungsschwelle für sich wiederholende Reize liegt bei einer Frequenz zwischen 5 – 20  $Hz$  (Kreiss et al., 2007).

### 1.2.1.2.3. Bolometerartige Infrarotrezeptoren bei Schlangen

Die Fähigkeit IR-Strahlung wahrzunehmen ist auch für Schlangen der Unterfamilie *Crotalinae* (Bullock and Diecke, 1956) und der Familien *Boidae* sowie *Pythonidae* (Barrett et al., 1970a) beschrieben. Die Schlangen nutzen ihre nach dem Bolometerprinzip arbeitenden IR-Rezeptoren zur Auffindung von Beute und zur Vermeidung von Räubern (Buning, 1985).

Bei den Grubenottern (*Crotalinae*) befinden sich die IR-Rezeptoren in zwei Gruben zwischen den Augen und den Nasenöffnungen auf der Vorderseite des Kopfes (Barrett et al., 1970b). Innerhalb der Gruben liegt je eine, nur 15  $\mu m$  dicke Membran (Terashima et al., 1968), die sowohl von vorn als auch von hinten von Luft umgeben ist (Newman and Hartline, 1982). In dieser durch die umgebende Luft thermisch vom Körper isolierten Membran liegen die Endigungen von 6000 – 7000 trigeminalen Nervenfasern (TNMs) direkt unter der Oberfläche (Buning, 1985; Newman and Hartline, 1982). Die Fasern ziehen über verschiedene Zwischenstationen im Hirn in das Tectum Opicum, in dem auch die visuellen Reize verarbeitet werden (Newman and Hartline, 1982). Die Grubenorgane zeigen in entsprechenden Experimenten eine Temperaturauflösung von nur 0.003  $^{\circ}C$  (Bullock and Diecke, 1956).

Bei den Boas (*Boidae*) und Pythons (*Pythonidae*) gibt es innerhalb der Familien verschiedene Ausprägungen der IR-Rezeptoren. Während Schlangen aus der Familie der Pythons 13 Paare von labialen Gruben auf der Ober- und Unterseite der Kiefer besitzen, haben andere Tiere wie beispielsweise die *Boa constrictor* keine labialen Gruben. Bei ihnen befinden sich die IR-Rezeptoren auf den labialen Schuppen. Sowohl die labialen Gruben als auch die Schuppen werden, wie die Membran in den Gruben der Grubenottern, durch die freien Endigungen trigeminaler Nervenfasern innerviert (Barrett et al., 1970b). Durch die geringere Anzahl von Nervenfasern in den labialen Gruben und den Schuppen und durch die fehlende Isolierung der

IR-rezeptiven Flächen sind die IR-Rezeptoren der Boas und Pythons deutlich weniger sensitiv als die der Grubenottern (Campbell et al., 2002). Sie können aber dennoch Temperaturunterschiede bis zu  $0.029\text{ }^{\circ}\text{C}$  auflösen (Barrett et al., 1970b). Die IR-Rezeptoren der *Python*-Schlangen absorbieren besonders gut im Bereich der beiden atmosphärischen Fenster von etwa  $3 - 5\ \mu\text{m}$  und  $8 - 12\ \mu\text{m}$ . Im Fenster von  $8 - 12\ \mu\text{m}$ , das einen Temperaturbereich von  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  umspannt, bei dem das  $\lambda_{max}$  im genannten Fensterbereich liegt, liegen auch die Temperatursignaturen möglicher Beute, von Räubern sowie von Aufwärmplätzen für die homoiothermen Tiere. Ein ähnliches Absorptionsverhalten der IR-Rezeptoren bei den Grubenottern und Boas ist anzunehmen (Grace et al., 1999).

Bei den Boas (*Boidae*) und Pythons (*Pythonidae*) gibt es innerhalb der Familien verschiedene Ausprägungen der IR-Rezeptoren. Während Schlangen aus der Familie der Pythons 13 Paare von labialen Gruben auf der Ober- und Unterseite der Kiefer besitzen, haben andere Tiere wie beispielsweise die *Boa constrictor* keine labialen Gruben. Bei ihnen befinden sich die IR-Rezeptoren auf den labialen Schuppen. Sowohl die labialen Gruben als auch die Schuppen werden, wie die Membran in den Gruben der Grubenottern, durch die freien Endigungen trigeminaler Nervenfasern innerviert (Barrett et al., 1970b). Durch die geringere Anzahl von Nervenfasern in den labialen Gruben und den Schuppen, und durch die fehlende Isolierung der IR-rezeptiven Flächen sind die IR-Rezeptoren der Boas und Pythons deutlich weniger sensitiv als die der Grubenottern (Campbell et al., 2002). Sie können aber dennoch Temperaturunterschiede bis zu  $0.029\text{ }^{\circ}\text{C}$  auflösen (Barrett et al., 1970b). Die IR-Rezeptoren der *Python*-Schlangen absorbieren besonders gut im Bereich der beiden atmosphärischen Fenster von etwa  $3 - 5\ \mu\text{m}$  und  $8 - 12\ \mu\text{m}$ . Im Fenster von  $8 - 12\ \mu\text{m}$ , das einen Temperaturbereich von  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  umspannt, bei dem das  $\lambda_{max}$  im genannten Fensterbereich liegt, liegen auch die Temperatursignaturen möglicher Beute, von Räubern sowie von Aufwärmplätzen für die homoiothermen Tiere. Ein ähnliches Absorptionsverhalten der IR-Rezeptoren bei den Grubenottern und Boas ist anzunehmen (Grace et al., 1999).

Bei beiden Schlangenfamilien werden die modifizierten *TRPA1*-Kanäle der trigeminalen Nervenfasern für die IR-Detektion genutzt (Gracheva et al., 2010).

### 1.2.1.2.4. Bolometerartige Infrarotrezeptoren bei der Vampirfledermaus *Desmodus rotundus*

Die Vampirfledermaus *Desmodus rotundus* ist die einzige bisher beschriebene Säugetierart, die in der Lage ist, IR-Strahlung über spezielle IR-Rezeptoren wahrzunehmen. Die IR-Rezeptoren der Fledermaus sitzen auf der Nase, die morphologisch in drei verschiedene Bereiche geteilt ist (Kürten and Schmidt, 1982). Hierdurch entstehen Gruben an deren Grund, umhüllt von Bindegewebe, die

IR-sensitiven Rezeptoren sitzen. Auch diese bestehen, wie bei den Schlangen, aus trigeminalen Nervenfasern. Anders als dort werden jedoch *TRPV1*-Kanäle zur Detektion der Strahlung genutzt. Diese werden normalerweise als Schmerzrezeptoren genutzt und reagieren beispielsweise auf schädliche Hitze von Temperaturen über  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Caterina et al., 1997).

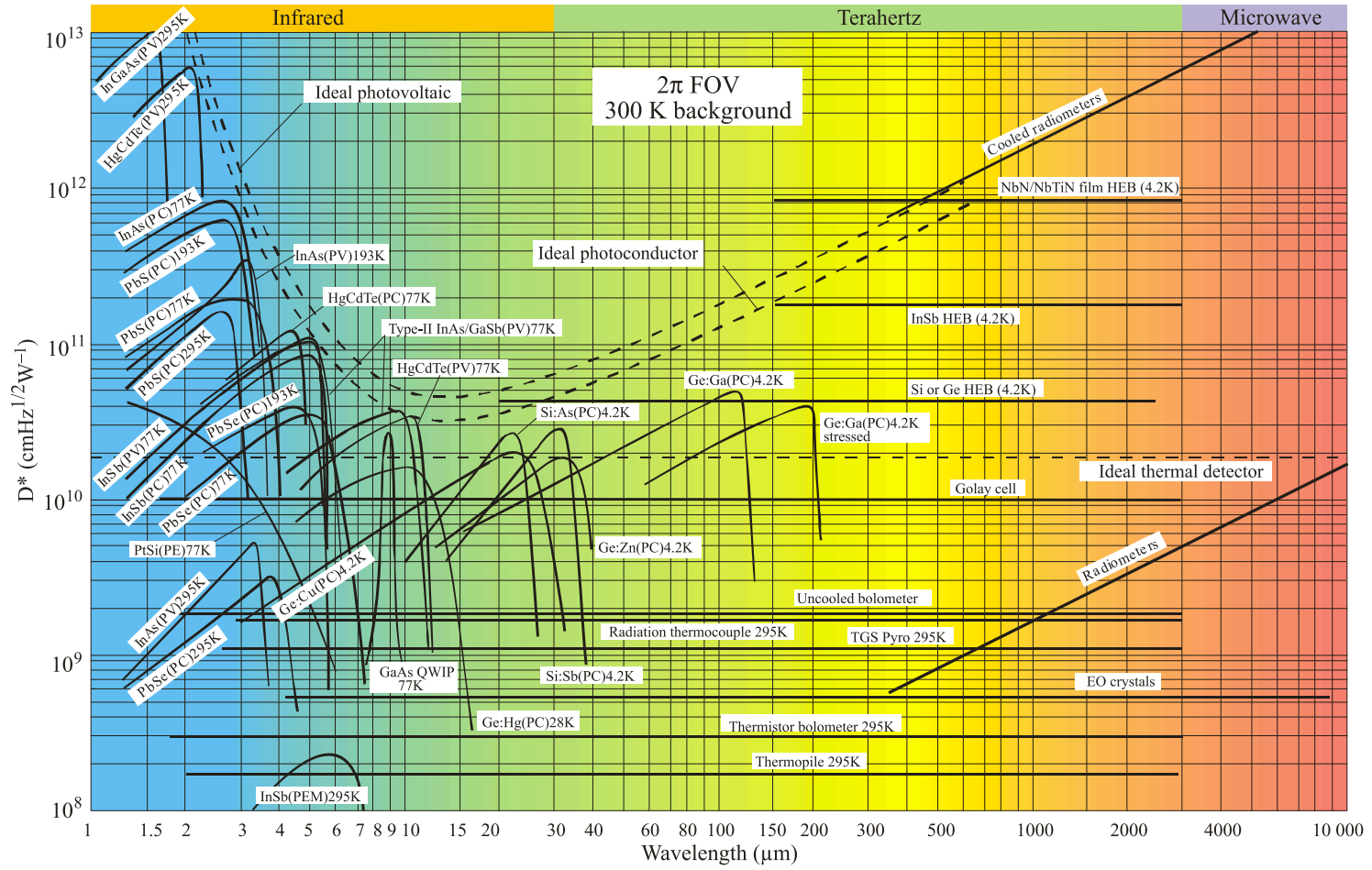
In *D. rotundus* ist Wärmesensitivität der *TRPV1*-Kanäle, als Anpassung an die geringeren Erwärmungen durch die Absorption von IR-Strahlung, auf  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  herabgesetzt (Gracheva et al., 2011). Ähnlich wie bei den Schlangen gibt es einen speziellen Nukleus im Gehirn der Fledermaus, der auf die Verarbeitung der IR-Reize spezialisiert zu sein scheint (Kishida et al., 1984). Die Gruben haben keine isolierende Luftschicht, die die Rezeptoren gegen den Körper isolieren, jedoch ist die Temperatur der Nase und ihrer Gruben um  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  herabgesetzt (Campbell et al., 2002). Hierdurch sind die Tiere in der Lage IR-Strahlung bis zu einer Intensität von  $0.5\text{ W/m}^2$  zu detektieren, was darauf schließen lässt, dass die Tiere damit in der Lage sind ein warmblütiges Tier auf eine Distanz von circa  $16\text{ cm}$  zu detektieren. Die Sensoren dienen wahrscheinlich zur Orientierung auf dem Beutetier und erleichtern womöglich das Auffinden einer geeigneten Bissstelle (Kürten and Schmidt, 1982).

### 1.2.2. Technische IR-Sensoren

Technische Infrarotsensoren lassen sich generell in zwei verschiedene Klassen unterteilen. Es gibt Sensoren, die eine Temperaturveränderung am Sensor messen (thermische IR-Sensoren) und Sensoren, die direkt die IR-Photonen messen (Photonendetektoren).

In jeder Klasse gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Prinzipien, wie das Signal erzeugt wird. Da der in dieser Arbeit untersuchte Sensor ein thermischer IR-Sensor ist, wird der Fokus hier auf in der Technik realisierte, kommerziell erhältliche, thermische IR-Sensorkonzepte gelegt und die Photonendetektoren etwas allgemeiner behandelt. Die wichtigsten Kenngrößen für IR-Sensoren wurden bereits in Kapitel 1.1.3 eingeführt.

Abbildung 1.4 aus Rogalski (2012) gibt einen Überblick über die  $D^*$ -Werte der meisten auf dem Markt befindlichen IR-Sensoren. Sie zeigt zudem die thermischen Limits der  $D^*$ -Werte für die einzelnen Sensorkategorien. Es ist deutlich zu sehen, dass die Photonendetektoren erheblich sensitiver sind und eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge besteht (siehe Kapitel 1.2.2.2). Die Abbildung zeigt zudem, dass mit Photonendetektoren deutlich größere  $D^*$ -Werte erreicht werden können als mit thermischen Detektoren. Dafür müssen diese jedoch sehr stark, auf teilweise bis zu  $4.2\text{ K}$  gekühlt werden, um das thermische Rauschen im Sensormaterial zu minimieren.



### 1.2.2.1. Thermische Detektoren

Wie in der Einleitung dieses Abschnitts erwähnt, gibt es eine Vielzahl von verschiedenen thermischen IR-Sensoren. Die folgende Auflistung soll einen groben Überblick über die kommerziell erhältlichen Systeme geben, die im Rahmen dieses Abschnitts detailliert beschrieben werden:

- Golayzelle
- Pyroelektrische Sensoren
- Mikrobolometer
- Thermopiles

Zudem gibt es eine Vielzahl von Konzeptideen, wie beispielsweise Bimetallsensoren oder Mikrogolayzellen, die sich aber bisher noch nicht auf dem IR-Sensorikmarkt etablieren konnten.

#### 1.2.2.1.1. Golayzelle

Dieser pneumatische IR-Sensor wurde von Marcel J. E. Golay bereits im Jahr 1947 vorgestellt (Golay, 1947). Das Grundprinzip besteht aus einer gasgefüllten Kammer, in die IR-Strahlung durch ein IR-transmissives Fenster eindringen kann. Im Inneren der Kammer befindet sich ein guter IR-Absorber mit möglichst niedriger thermischer Masse, der die einfallende IR-Strahlung absorbiert und die Wärme an das Gas in der Kammer abgibt. Als Gas wird aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit, wie von Golay vorgeschlagen (Golay, 1947), meist Xenon genutzt (Lee, 2009). Das erwärmte Gas expandiert, was zu einer Deformation einer weichen, großen Membran

---

**Abbildung 1.4. (gegenüberliegende Seite):** Vergleich der  $D^*$ -Werte verschiedener verfügbarer Sensoren, wenn sie bei der angegebenen Temperaturen betrieben werden. Die Chopperfrequenz ist für alle Sensoren  $1000\text{ Hz}$ . Beim Thermopile, Thermocouple, Thermistor Bolometer, der Golayzelle und dem pyroelektrischen Sensor beträgt die Chopperfrequenz  $10\text{ Hz}$ . Die angegebenen Werte gelten für jeden Sensor bei einer Umgebungstemperatur von  $300\text{ K}$  und einem hemisphärischen Sichtfeld. Die gestrichelten Linien geben den theoretisch maximalen  $D^*$ -Wert des Sensors an.

PC - photoconductive Sensor, PV - photovoltaic Sensor, PEM - photoelectromagnetic Sensor und HEB - „hot electron bolometer“; Abbildung übernommen aus (Rogalski, 2012).

auf der Rückseite des Sensors führt, die zumeist optisch detektiert wird. Aus dieser Deformation kann die Temperaturänderung des Gases und somit auch die Intensität der einfallenden IR-Strahlung berechnet werden. Durch das optische Auslesen der Membran sind diese Sensoren im Vergleich zu anderen IR-Sensoren sehr groß und wenig robust (Budzier and Gerlach, 2010). Aufgrund der Größe sind sie nicht als Array erhältlich und somit auch nicht unter den bildgebenden Sensoren zu finden. Die Sensoren haben, mit einem  $D^*$ -Wert von um die  $7 - 11 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (TYDEX J.S.Co., 2014), für ungekühlte thermische IR-Sensoren eine sehr hohe spezifische Detektivität.

Viele Forschungsgruppen beschäftigen sich schon lange mit einer Miniaturisierung der Golayzelle, um eine Mikrogolayzelle zu entwickeln. Durch die Miniaturisierung wird angestrebt die Sensoren auch als Arrays bauen zu können, was es ermöglichen würde Golayzellen auch für bildgebende Sensorsysteme zu verwenden. Die Mikrogolayzellen sollen meist kapazitiv ausgelesen werden, was eine Miniaturisierung erlaubt und diese etwas robuster macht. Die spezifische Detektivität dieser Sensoren bleibt bisher jedoch noch weit hinter der der großen Golayzellen zurück. Als bester, während der Recherchen gefundener Wert für miniaturisierte Golayzellen sei hier  $1.3 \cdot 10^6 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  genannt (Schossig et al., 2013).

### 1.2.2.1.2. Pyroelektrische Sensoren

Pyroelektrische Sensoren sind thermische Detektoren, die sich die Temperaturabhängigkeit der spontanen Polarisierung von einigen kristallinen Materialien zunutze machen. Durch eine Änderung der Temperatur entstehen gerichtete Oberflächenladungen. Es kommt also zu einer Ladungstrennung über die Zeit; es fließt ein elektrischer Strom (Dereniak and Boreman, 1996). Da sich die Oberflächenladungen mit der Zeit selbst wieder ausgleichen, müssen die Temperaturänderungen, die die Oberflächenladungen induzieren, schneller erfolgen als diese durch freie Ladungsträger wieder ausgeglichen werden können. Die zu detektierende IR-Strahlung muss also gehoppert werden und es gibt zwangsläufig eine minimale Frequenz, die nicht unterschritten werden darf (Rogalski, 2011).

Durch die Änderung der Temperatur kommt es außerdem zu einer Längenänderung (thermische Ausdehnung) des pyroelektrischen Kristalls. Da alle pyroelektrischen Materialien gleichzeitig auch piezoelektrisch sind (Budzier and Gerlach, 2010), kommt es zudem zu einer Ladungstrennung durch eine mechanische Spannung, induziert durch die Längenausdehnung des Kristalls. Diese Effekte werden auch primärer (Polarisation durch Temperaturänderung) und sekundärer (Polarisation durch mechanische Spannung) pyroelektrischer Effekt genannt (Budzier and Gerlach, 2010). Durch die Anisotropie der piezoelektrischen Materialien müssen die Richtungen der entstehenden Ladungstrennung durch pyroelektrischen und

piezoelektrischen Effekt gleich ausgerichtet sein, um eine maximale Empfindlichkeit zu erreichen (Budzier and Gerlach, 2010).

Neben Kristallen, die piezo- und pyroelektrisch sind, gibt es auch noch solche, die zusätzlich ferroelektrisch sind und die meist als Sensormaterialien genutzt werden. Bei ihnen ist die Richtung der Polarisierung durch das Anlegen eines geeigneten elektromagnetischen Feldes schaltbar (Rogalski, 2011). Durch das Aufprägen dieser Felder mittels Hitze kann im Ferroelektrikum eine stärkere Polarisierung erreicht werden als dies ohne von außen angelegtem Feld der Fall wäre. Dies führt im Endeffekt zu einem stärkeren Sensorsignal (Budzier and Gerlach, 2010; Dereniak and Boreman, 1996).

Lithiumtantalat ( $LiTaO_3$ ) ist aufgrund der geringen Abhängigkeit des pyroelektrischen Koeffizienten von der im Betriebsbereich üblich herrschenden Temperatur das Standardmaterial für pyroelektrische Sensoren. Es zeigt also nur geringe Abweichungen der Sensitivität über einen Temperaturbereich von  $0 - 70\text{ }^\circ\text{C}$  (Budzier and Gerlach, 2010). Für Einsatzorte und -zwecke mit anderen Betriebsbedingungen werden dementsprechend meist andere Materialien verwendet.

Die Sensoren können entweder im Spannungs- oder im Strombetrieb genutzt werden. Im Spannungsbetrieb wird die Spannung gemessen, die durch die Trennung der Ladungen entsteht, im Strombetrieb wird der fließende elektrische Strom gemessen.

Bildgebende Kameras gibt es bereits mit mehr als  $640 \times 480$  Pixeln und NETD-Werten von  $< 80\text{ mK}$  bei  $50\text{ Hz}$  (DIAS Infrared GmbH, 2014b). Einzelelementsensoren oder kleine Arrays haben eine Detektivität von um die  $10^9\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (DIAS Infrared GmbH, 2014a)

### 1.2.2.1.3. Thermopiles

Thermopiles (Thermosäulen) bestehen aus vielen in Reihe geschalteten Thermocouples (Thermoelementen), deren Funktionsweise auf dem Seebeck-Effekt beruht. Nach diesem fließt ein kleiner Strom, wenn zwei unterschiedliche Metalle unterschiedlicher Temperatur verbunden werden (1821 entdeckt von Thomas Johann Seebeck) (Rogalski, 2012). Üblicherweise bewegt sich die Spannung zwischen den beiden Enden eines Thermocouples im Bereich von einigen  $\mu\text{V}/\text{K}$ ; sie ist also zu klein um sie reproduzierbar messen zu können. Um die messbare Spannung zu erhöhen, werden daher viele einzelne Thermocouples in Reihe zu einem sogenannten Thermopile zusammengeschaltet. Da für eine möglichst hohe Spannung die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Enden möglichst groß sein sollte, werden diese thermisch gegeneinander isoliert (Rogalski, 2012).

Die Seite der Thermocouples, die der IR-Strahlung zugewandt ist, wird als „hot junction“ bezeichnet und beschichtet, um eine möglichst hohe Absorption zu errei-

chen. Folglich wird die der IR-Strahlung abgewandte Seite „cold junction“ genannt und, wie oben beschrieben, möglichst gut von der hot junction isoliert (Dereniak and Boreman, 1996).

Um die Temperatur an der hot junction berechnen zu können, muss die Temperatur der cold junction bekannt sein (Budzier and Gerlach, 2010).

Für bildgebende Verfahren sind die Thermopiles aufgrund ihrer Größe und da sie recht langsam antworten nur bedingt einsetzbar. Meist werden sie als Einzelelement oder in Form von kleinen Linienarrays zur berührungslosen Temperaturmessung genutzt. Als aktuelles Beispiel eines bildgebenden Sensors sei ein Sensor mit 82x62 Pixeln genannt, der mit einer Bildfrequenz von 9 Hz betrieben werden kann (Heimann Sensor GmbH, 2014b), die NETD liegt bei 115 mK bei 9 Hz. Auch andere bildgebende oder Einzel- bis Wenigelement-Thermopile-Sensoren werden üblicherweise mit Frequenzen unter 25 Hz betrieben (Dereniak and Boreman, 1996). Die  $D^*$ -Werte für Einzelelementensensoren liegen meist bei niedrigen Werten von  $10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (Heimann Sensor GmbH, 2014a).

### 1.2.2.1.4. Mikrobolometer

Mikrobolometern machen sich die starke Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von einigen Materialien zunutze, die als dünne, elektrisch leitende Absorberschichten Verwendung finden. Kommt es zu einer Temperaturerhöhung dieser Schichten durch die Absorption von IR-Strahlung, führt dies zu einer Änderung des Widerstandes, wodurch der Stromfluss durch den Absorber verändert wird, was wiederum zu einer Spannungsänderung führt. Diese Spannungsänderung wird gemessen und dient zur Ermittlung der Temperaturänderung beziehungsweise der Ermittlung der Intensität der absorbierten IR-Strahlung.

Die Änderung des Widerstandes wird durch den TCR (Temperature Coefficient of Resistance) beschrieben. Metalle haben immer einen positiven TCR, da es durch eine Erwärmung zu einer Erhöhung des Widerstandes kommt. Halbleitermaterialien wie Vanadiumoxid ( $VO_x$ ) oder amorphes Silizium ( $\alpha Si$ ) haben hingegen negative TCR, sie leiten also besser, wenn sie erwärmt werden. Die Änderung pro Grad Celsius ist bei den Halbleitern erheblich größer als bei den Metallen (Budzier and Gerlach, 2010), weshalb sie für den Sensorbau besonders interessant sind.

Einzelne Mikrobolometerelemente bestehen aus einer dünnen Folie, auf der der eigentliche Bolometerwiderstand liegt. Diese Folie wird von zwei Stützen nur wenige  $\mu\text{m}$  über einer dünnen Reflektorschicht gehalten. Durch den Abstand zu der auf der Auslesemembran aufliegenden Reflektorschicht wird der Widerstand einerseits thermisch von dieser isoliert, andererseits ist der Abstand so angepasst, dass dieser als optischer Resonator fungiert und mit einer maximalen Absorption zu rechnen ist. Um die thermische Isolation zu verbessern befindet sich der Aufbau



im Vakuum.

Ein einzelnes Mikrobolometerelement hat nur eine Größe von etwa  $17 \mu\text{m}^2$ ; somit eignen sich Mikrobolometer hervorragend für bildgebende Sensorarrays mit hoher Auflösung. Sie können zudem von Standard-CMOS-Chips ausgelesen werden, wie sie beispielsweise auch in Digitalkameras zum Einsatz kommen (Budzier and Gerlach, 2010; Rogalski, 2011).

Typische Arrayformate sind  $320 \times 320$ ,  $640 \times 480$  und auch  $1024 \times 768$  IR-Pixel bei Bildwiederholungsfrequenzen von normalerweise  $30 \text{ Hz}$ . Die NETD ist üblicherweise  $< 50 \text{ mK}$  (InfraTec GmbH, 2014). Da die Kamerasysteme häufig als Nachtsichtassistenten oder zur Überwachung von Gebieten genutzt werden, ist der Spektralbereich meist auf die Temperaturen warmblütiger Tiere (Menschen) angepasst und liegt im zweiten atmosphärischen Fenster von  $8 - 12 \mu\text{m}$ .

Die Detektivität wird bei Mikrobolometern meist nicht angegeben, der höchstmögliche Wert liegt jedoch bei  $D^* = 1.98 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (Rogalski, 2003). Eine der wenigen Quellen beschreibt einen  $D^*$ -Wert von  $4 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  (Moreno et al., 2012).

### 1.2.2.2. Photonendetektoren

Anders als in thermischen IR-Sensoren wird in Photonendetektoren das gemessene elektrische Signal durch eine Änderung der Elektronenverteilung im Absorber hervorgerufen. Diese Sensoren zeigen meist eine starke Wellenlängenabhängigkeit in ihrem Antwortverhalten, denn anders als bei thermischen IR-Detektoren wird der Wellenlängenbereich, in dem Photonendetektoren arbeiten, durch die Bandlücke des Materials und die Arbeitstemperatur bestimmt. Für Materialien wie Silizium (Si) liegt die Grenzwellenlänge, also die Wellenlänge, bei der die maximale Sensitivität erreicht werden kann, bei  $1.1 \mu\text{m}$ . Es ist also nur im nahen IR-Bereich einsetzbar (Budzier and Gerlach, 2010).

Da die Bandlücke temperaturabhängig ist und um das sehr gute Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) sowie die hohe Sensitivität von gängigen Photonendetektoren zu erreichen müssen diese in der Regel gekühlt werden (Rogalski, 2012).

Die kommerziell erhältlichen Photonen-IR-Sensoren sind meist „Photoconductive“ (PC) oder „Photovoltaic“ (PV). Für beide Arten können die gleichen Materialien genutzt werden. Meist werden Si, InSb und HgCdTe (MCT) als Detektormaterialien genutzt (Vincent, 1990).

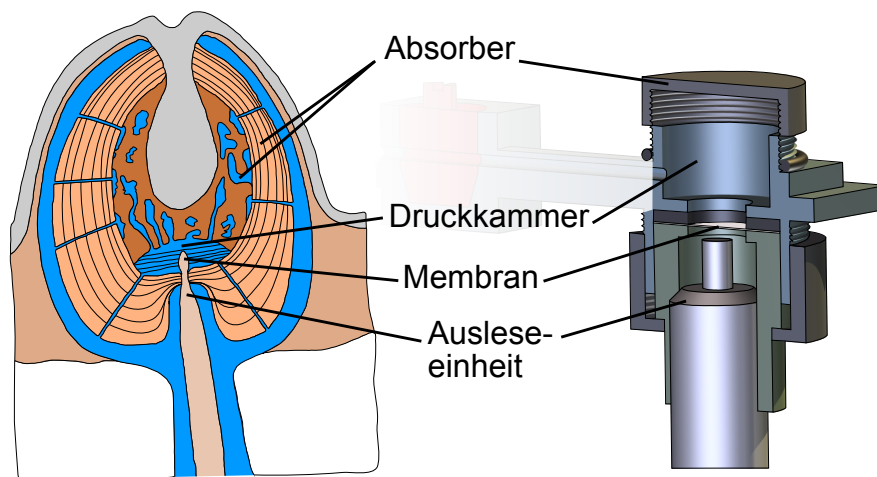
Durch die aufgenommene Energie bei einer Interaktion mit einem Photon wird ein Elektron aus dem Valenzband über die Bandlücke hinweg auf das Leitungsband versetzt. Hierdurch entsteht ein Elektron-Loch-Paar, wodurch die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiters geändert wird (Rogalski, 2011). Anhand der Änderung der

Strom-Spannungs-Charakteristik kann die IR-Strahlung detektiert und ihre Intensität ermittelt werden.

Der Unterschied zwischen den PC- und den PV-Sensoren besteht in der unterschiedlichen Art, die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit aufzunehmen, die entsprechend verschiedene Vor- und Nachteile hat. Abbildung 1.4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Detektormaterialien, ihre Detektivität, den Typ ihrer Ausleseelektronik (PC oder PV) und die Temperaturen bei denen sie betrieben werden.

### 1.3. Das bionische Modell

Für den Übertrag des biologischen, photomechanischen Prinzips wurden die wichtigsten Komponenten des Sensillums von *Melanophila acuminata* auf einen technischen Prototypen übertragen. So gibt es eine Fluidkammer/Druckkammer, einen speziellen Absorber und eine Membran, deren Auslenkung mithilfe eines sensitiven Messverfahrens ausgelesen wird (siehe Abbildung 1.5).



**Abbildung 1.5.:** Schematische Darstellung des Übertrags des biologischen Modells auf einen technischen Prototypen

Einige Komponenten und Prinzipien konnten jedoch aufgrund der sehr geringen Größe des biologischen Modells nicht mit in den Prototypen übernommen werden. So war es nicht möglich Absorber zu fertigen, die so dünn sind, dass die IR-Strahlung sie durchdringen und vom Fluid absorbiert werden kann. Hier wurde stattdessen ein IR-transmissives Fenster genutzt, um das Fluid direkt durch die Absorption der Strahlung zu erwärmen. Um zu testen, was bei einer ausschließlichen Absorption

der Strahlung in der Kutikula passieren würde, wurden Absorber aus verschiedenen Materialien genutzt, die die Strahlung absorbieren und die Wärme an das Fluid im Sensor leiten sollten. Da die genaue Zusammensetzung des Fluids im Inneren des Sensors unbekannt ist wurden verschiedenen Fluide ausgewählt und auf ihre Eignung als Sensorfluid getestet. Diese waren teils technisch und teils biologisch inspiriert.

Um den Prototyp nicht weiter vergrößern zu müssen, wurde auf eine Realisierung der Ausgleichskanäle zwischen der Fluidkammer und dem äußeren, um den Sensor herumliegenden Fluidreservoir, verzichtet. Stattdessen wurde bei jeder neuen Befüllung über das Ventil der Druck in der Kammer an den Umgebungsdruck angepasst, damit ein reproduzierbares Sensorsignal gemessen werden konnte. Zudem wurde durch die Aufnahmesoftware ein DC-Remove auf die Messdaten angewendet, der das DC-Signal eliminiert hat, das durch eine sich langsam ändernde Umgebungstemperatur entstand (siehe Abschnitt 2.2.2.2).

### 1.4. Zielsetzung

Ziel der Dissertation ist es, den Einfluss von verschiedenen Absorbermaterialien und Sensorfluiden auf die Antworteigenschaften des Sensorprototypen zu untersuchen und aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf die Funktionsweise des biologischen Vorbildes zu ziehen.

Anhand von Experimenten und Simulationen sollen folgende Fragen für den Sensorprototypen beantwortet werden:

- Welche Materialparameter des Absorbers sind wichtig?
- Welche Fluideigenschaften sind wichtig?
- Wie lässt sich die Sensorantwort maximieren?

Mithilfe der Antworten auf diese Fragen soll nicht nur die Eignung des photomechanischen Prinzips nach dem Vorbild von *Melanophila* für technische Sensoren neu evaluiert werden, sondern auch offene Fragen bezüglich der Funktionsweise des Käfersensillum diskutiert werden.



# Kapitel 2.

## Material und Methoden

Zunächst sollen der Aufbau und die verwendeten Methoden eines Sensorprototypen aus dem Forschungszentrum (FZ) caesar (center of advanced european studies and research) erläutert werden, der für Vergleichsmessungen genutzt wurde, da sich dieser grundlegend von den anderen Sensorkonfigurationen unterscheidet und zudem eine andere Ausleseelektronik benötigt. Anschließend sollen der Aufbau und die Ausleseelektronik des selbst entwickelten Prototypen erläutert werden.

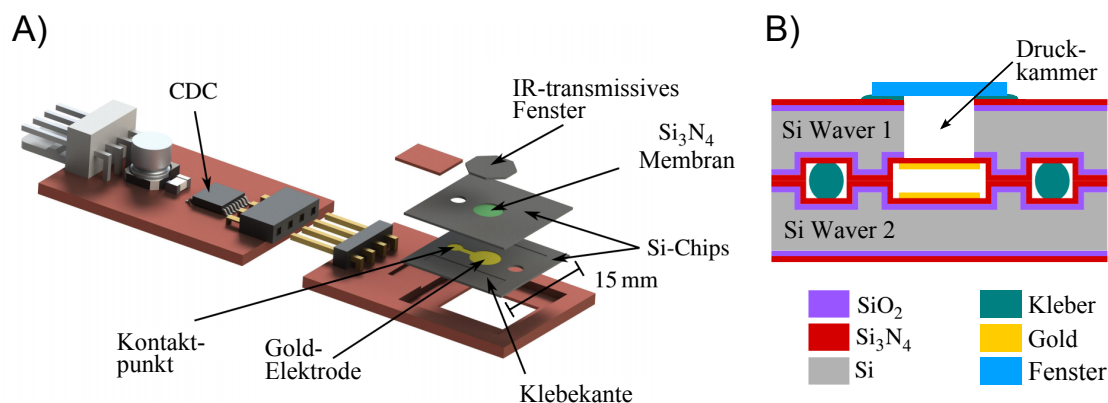
### 2.1. Im FZ caesar hergestellter Sensorprototyp

Der Prototyp aus dem FZ caesar und dessen Ausleseelektronik wurde freundlicherweise von der Abteilung für Mikrosystemtechnik (Leiter Herr Dr. S. Steltenkamp) zu Verfügung gestellt.

#### 2.1.1. Aufbau Sensorprototyp FZ caesar

Der Sensor bestand aus zwei miteinander verklebten, becherförmigen Siliziumchips (siehe Abbildung 2.1, Si-Waver 1 und 2), die zusammen die Ausleseinheit bilden. Die Becher hatten einen Durchmesser von  $3.3 \text{ mm}$ . Auf der Unterseite des oberen Siliziumchips befand sich eine flexible Elektrodenmembran eines Plattenkondensators aus Goldelektroden, die den Boden des Bechers bildete. Die Membran hatte also ebenfalls einen Durchmesser von  $3.3 \text{ mm}$ . Der untere Siliziumchip (Si-Waver 2) enthielt die zweite Goldelektrode des Plattenkondensators, die sich auf dem Grund des Bechers befand. Über die Tiefe des Bechers des unteren Chips konnte bei der Herstellung der Elektrodenabstand definiert werden. In den für die Experimente genutzten Sensoren betrug der Abstand der beiden Kondensatorplatten  $300 \text{ nm}$ . Die offene Oberseite des Bechers des oberen Siliziumchips (Si-Waver 1) wurde durch

ein IR-transmissives Fenster verschlossen. Auf diese Weise entstand eine 0.3 mm tiefe Druckkammer, die je nach Versuchsssetup mit Wasser oder Luft befüllt werden konnte, bevor das Fenster fest mit dem Siliziumchip verklebt wurde.



**Abbildung 2.1.:** Schematische Darstellung des Sensorprototyps aus dem FZ caesar; A) Zeichnung des Sensorsprototyps mit verbundenem „capacitance-to-digital converter“ (CDC), B) Querschnitt durch den Sensorprototyp. Modifiziert nach (Siebke et al., 2014a)

Da die Sensorfüllung nach dem Verkleben des IR-transmissiven Fensters nicht mehr austauschbar war, mussten für die Messungen mit Luft und Wasser jeweils andere Sensoren benutzt werden. Für den luftgefüllten Sensor wurde Silizium als IR-transmissives Fenster verbaut. Dieses besitzt im Bereich von circa 2 – 6  $\mu\text{m}$  eine IR-Transmissivität von etwa 50%. Dieses „Siliziumfenster“ wurde mit UHU Endfest 300 (Firma UHU, (Deutschland)) auf den oberen Chip (Si-Waver1) geklebt und schloss so die Druckkammer nach oben hin luftdicht ab.

Für den mit Wasser gefüllten Sensor wurde Borosilikatglas als IR-transmissives Fenster genutzt (Transmissionspektrum siehe (Schott AG (2014)): 90%ige IR-Transmission von 0.78  $\mu\text{m}$  bis 2.5  $\mu\text{m}$ , danach auf 40% abfallend mit erneutem Transmissionspeak bei etwa 3.2  $\mu\text{m}$ , bei höheren Wellenlängen ist kaum noch eine Transmission vorhanden). Dieses wurde mithilfe eines wasserfesten Klebers (Kiwoprint L4002, KIWO Inc. (USA) und UHU Endfest 300, UHU (Deutschland)) auf dem oberen Chip (Si-Waver1) über der gewässerten Druckkammer festgeklebt. In beiden Konfigurationen wurden die Sensoren in eine Platine mit den Maßen 15 × 15 × 0.6 mm (L×B×H) eingelassen. Diese Platine konnte auf eine weitere Platine gesteckt werden, auf der ein „capacitance-to-digital converter“ (CDC, AD7746 von Analog Devices Inc. (USA)) mit einem Messbereich von  $\pm 4$  pF (Pikofarad) verbaut war. Das digitalisierte Signal wurde über ein Kabel zu einer dritten Platine geleitet (nicht gezeigt), auf der sich ein Mikrocontroller mit einer

I2C-Schnittstelle befand. Die Daten wurden über die Schnittstelle und mithilfe eines im FZ caesar geschriebenen Datenaufnahmeprogramms an einen Computer übertragen. Eine detaillierte Beschreibung der Ausleseelektronik ist in Siebke et al. (2014a) zu finden.

Das Programm zur Datenaufnahme wurde mit den folgenden Parametern für den CDC betrieben:

- Die Measurementvoltage des CDC entspricht drei Achteln der Versorgungsspannung:  $V_{dd} \cdot 3/8$
- Measurement Time = 62 *ms*, dies entspricht einer Samplingrate von 16.1 *Hz*
- Ein Übergabedelay der Daten von CDC an den PC von 0.125 *s* führte zu einer tatsächlichen Aufnahmefrequenz der Messdaten von 8 *Hz*

Als Papier, das in Versuch 3.2.1.2 zur Abdeckung des IR-transmissiven Fensters genutzt wurde, wurde Druckerpapier verwendet (80  $g/m^2$ , ISO 100 Weiße, EvolutionWhite, Firma Steinbeis, Deutschland).

### 2.1.2. Messprotokoll für die Messungen mit dem Sensorprototypen aus dem FZ caesar

Der Sensor wurde in einem Abstand von 26 *cm* vor einem 500 °C heißen Schwarzkörperstrahler (CS500, Firma DIAS Infrared, (Deutschland)) positioniert. Daraus ergab sich eine Strahlungsintensität von 260  $W/m^2$ . Auf einer Sensorfläche von 17.1  $mm^2$  ( $17.1 \cdot 10^{-4} m^2$ ) entsprach dies einer Strahlungsintensität von 0.00445 *W* (4.45 *mW*), die am Absorber eintraf. Ein Chopper (2 Slot Chopper Blade, Controller MC1000 Thorlabs Inc, (USA)) wurde in einem Abstand von 6 *cm* vor dem Sensor aufgestellt. Der große Abstand zwischen Chopper und Sensor verhinderte Einstreuungen von Kapazitäten durch den sich drehenden Chopper. Die IR-Strahlung wurde durch den Chopper mit 1 *Hz* moduliert. Für die Rauschmessung wurde der Sensor nicht der Strahlung exponiert und der Chopper ausgeschaltet.

Die durch die IR-Expositionen ausgelösten, aufgenommenen Sensorantworten sowie die Rauschmessung wurden nach der Datenaufnahme zu einer einzelnen Textdatei kombiniert. Wenn nötig wurden kleinere Störungen in der Rauschmessung korrigiert. Diese in nur einer Messung aufgetretenen Störungen zeigten einzelne Datenpunkte, die um etwa 2 *pF* von den übrigen abwichen (bei einem Messbereich von maximal  $\pm 4.096 pF$ ), und somit eindeutig als Störungen zu identifizieren waren. Zur Korrektur wurden die entsprechenden Datenpunkte mit dem Wert des vorangegangenen Datenpunktes überschrieben, der diese Störung nicht zeigte.

Anschließend folgte eine weitere Bearbeitung der aufgenommenen Datenreihen in

Spike2 (Spike2, Version 5, Firma Cambridge Electronic Design Limited (CED), (England)). Die Daten wurden aus der Textdatei über die Importfunktion in jeweils einen eigenen Kanal importiert. Anschließend erfolgten die Anwendung eines DC-Remove Filters (Zeitkonstante 1 s) und eine Glättung („Smooth“, Zeitkonstante 0.05 s) für beide Datenreihen. Danach wurden beide Datenreihen wieder zu einer einzelnen Textdatei zusammengefasst, exportiert und in MATLAB (Firma The MathWorks GmbH, (Deutschland)) importiert.

In MATLAB wurden aus jeder aufgenommenen Datenreihe 401 Datenpunkte ausgewertet. Dies entsprach einer Messdauer von 50 Sekunden.

Zur Bestimmung der Peak-to-Peak-Amplitude wurden der Maximal- und der Minimalwert jeder Chopperperiode bestimmt, ihre Beträge ermittelt und diese anschließend addiert. Die Bestimmung des Rauschens erfolgte über die Ermittlung des Root-Mean-Square (RMS) über die gesamte Zeitdauer der Rauschmessung. Das Signal-to-Noise-Ratio (SNR) wurde nach Formel 1.5 in Abschnitt 1.1.1 berechnet. Für die angewendete Fast-Fourier-Transformation (FFT) wurde die von MATLAB zur Verfügung gestellte Funktion mit einer Bin-Breite von 0.125 Hz genutzt.

## 2.2. Eigener Prototyp

Anders als die oben vorgestellten Prototypen aus dem FZ caesar sind die im Folgenden vorgestellten Sensorprototypen Eigenentwicklungen, die im Rahmen dieser Dissertation entstanden sind.

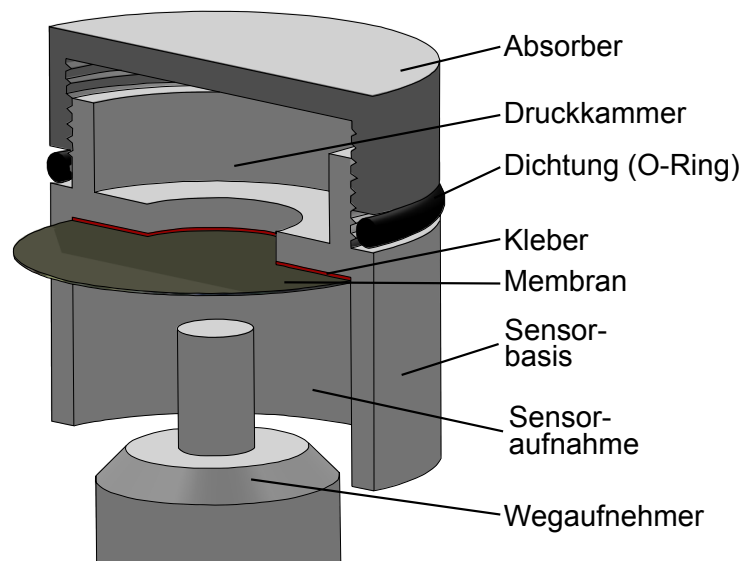
### 2.2.1. Aufbau des Sensors

Im Rahmen der ersten Versuche wurde mit einer Vielzahl verschiedener Sensoraufbauten experimentiert, bis solche gefunden wurden, mit denen Messungen möglich waren. Die Sensoren waren immer modular aus einer Ausleseinheit, einer Sensorbasis und einem Absorber aufgebaut, so dass eine Vielzahl von Experimenten mit einem geringen Materialaufwand möglich war. Die Sensorbasis wurde meist aus einem Stück Kunststoff gefertigt und beherbergte eine mit Fluid befüllbare Kammer (Druckkammer). Zudem diente sie als Basis zur Anbringung von Absorbern und Ausleseeinheiten. Folgend soll zunächst eine frühe Version des Sensors mit einer eingeklebten Membran und ohne integriertes Ventil vorgestellt werden. Anschließend wird die für die meisten der Versuche dieser Arbeit genutzte Sensorbasis mit einem integrierten Ventil und angepresster Membran vorgestellt.



### 2.2.1.1. Aufbau des Sensors mit einer Sensorbasis ohne Ventil

Wie oben beschrieben war der Sensor modular aufgebaut. Als Ausleseeinheit wurde hier ein kapazitiver Wegaufnehmer genutzt, der die Auslenkung einer unter die Druckkammer geklebten Membran auslesen konnte (siehe Abbildung 2.2). Um den Wegaufnehmer nutzen zu können, musste die Membran elektrisch leitend und geerdet sein. Es stellte sich eine antistatische Folie (electrostatic discharge (ESD) Folie, SCC1000 von der Firma 3M) als geeignete Membran heraus.



**Abbildung 2.2.:** Schematische Abbildung des Sensors ohne Ventil

Die Sensorbasis bestand aus einem Zylinder aus schwarzem PVC mit einem Außendurchmesser von  $15\text{ mm}$  und einer Höhe von  $11\text{ mm}$ . Auf der Oberseite wurde zunächst ein Becher mit einem Innendurchmesser von  $11\text{ mm}$  und einer Tiefe von  $3\text{ mm}$  ausgefräst. Dieser diente als unterer Teil der Druckkammer. Über die gesamte Außenseite dieses Bechers wurde zudem ein Außengewinde ( $M13 \times 0.5\text{ mm}$ ) gedreht, auf das die absorbierende Einheit geschraubt werden konnte, die dann die Druckkammer nach oben hin abschloss.

In die Unterseite des Zylinders wurde ebenfalls ein Becher mit einer Tiefe von  $7\text{ mm}$  und einem Innendurchmesser von  $13\text{ mm}$  gefräst, der als Teil einer Sensoraufnahme für den kapazitiven Wegaufnehmer diente. In die  $1\text{ mm}$  dicke PVC-Schicht zwischen Druckkammer und Sensoraufnahme wurde mittig ein Loch mit einem Durchmesser von  $4\text{ mm}$  gebohrt, das beide miteinander verband.

Dieses  $4\text{ mm}$  breite Loch wurde mittels einer Membran aus ESD-Folie von unten verschlossen. Hierfür wurde die ESD-Folie mit einem Spezialkleber (DP 8010, 3M

Scotch-Weld, (USA)) an die Oberseite der Sensoraufnahme geklebt, so dass sie die Druckkammer von unten verschloss. An der Folie wurde mit Leitsilber (G302, Firma Plano GmbH, (Deutschland)) ein dünner Golddraht befestigt, mit dem die Folie über die Hülle des kapazitiven Wegaufnehmers geerdet werden konnte.

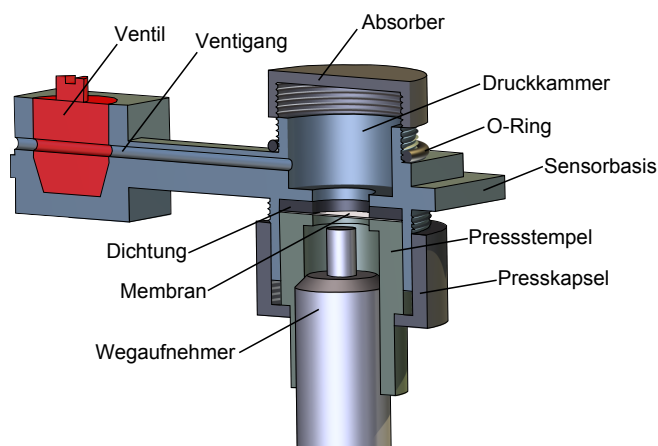
Zusammen mit einer absorbierenden Einheit (siehe Abschnitt 2.2.1.3) bildete der Becher auf der Oberseite der Sensorbasis die Druckkammer, deren Boden, also die flexible ESD-Folie, ausgelenkt werden konnte. In die Druckkammer wurde für die Versuche destilliertes Wasser eingefüllt (siehe Abschnitt 2.2.2.3). Um die Verbindung zwischen der absorbierenden Einheit und der Sensorbasis luftdicht zu gestalten, wurde um den unteren Teil des Außengewindes der Sensorbasis ein passender O-Ring gestülpt, der von der aufgeschraubten absorbierenden Einheit fest auf die Sensorbasis gepresst wurde.

Zur Messung der Membranauslenkung wurde ein kapazitiver Wegaufnehmer genutzt (Modell 4810 mit einem 2803-Sensorkopf,  $\pm 5 V$  vom 0-Punkt  $\hat{=}$   $\pm 50 \mu m$  vom 0-Punkt, 1000 Hz Samplingrate, Auflösungsvermögen 6.64 nm, Firma ADE Technologies (heute MicroSense), (USA)). Dieser konnte mittels eines Verbindungsstückes ( $13 \times 8 \times 10 mm$ ,  $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) fest an der Unterseite des Sensors in der Sensoraufnahme angebracht werden.

### 2.2.1.2. Aufbau des Sensors mit einem integrierten Ventil

Auch dieser Sensor wurde modular aus drei Teilen aufgebaut. Anders als im vorangegangenen Abschnitt wurde hier jedoch eine Sensorbasis mit einem integrierten Ventil genutzt. Zudem wurde die Membran nicht eingeklebt sondern mittels eines Anpresssystems an der Basis angebracht. Eine genaue Beschreibung dieses Systems ist in Abschnitt 2.2.1.2.1 zu finden. Die genutzten absorbierenden/IR-transmittierenden Einheiten werden in Abschnitt 2.2.1.3 separat vorgestellt.

Die Sensorbasis wurde aus einem Stück schwarzen PVC gefertigt (siehe Abbildung 2.3). Die Grundplatte hatte die Maße  $15 \times 45 \times 2 mm$  (Breite  $\times$  Länge  $\times$  Höhe); auf ihrer Oberseite war ein Becher mit den Maßen  $13 \times 11 \times 5 mm$  ( $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) integriert. Über die gesamte Höhe dieses Bechers wurde ein Außengewinde gedreht ( $M13 \times 0.5 mm$ ), das als Gegenstück zum Innengewinde der absorbierenden/IR-transmittierenden Einheit fungierte und um das ein O-Ring zur luftdichten Verbindung mit dem Absorber gelegt wurde. Zusammen mit der absorbierenden/IR-transmittierenden Einheit bildete der Becher eine 9 mm hohe Druckkammer. Auf der Unterseite der Sensorbasis wurde für die Sensoraufnahme ein weiterer Becher mit den Maßen  $15 \times 13 \times 10 mm$  ( $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) ausgedreht. Auch in diesen wurde ein Außengewinde gedreht ( $M15 \times 0.5 mm$ ). Auf das Außengewinde ließ sich



**Abbildung 2.3.:** Schematische Zeichnung des Sensors mit absorbierender Einheit, Sensorbasis mit integriertem Ventil und -exemplarisch- einem kapazitiven Wegaufnehmer als Ausleseeinheit

eine sogenannte Presskapsel schrauben, die Teil des Mechanismus zur Befestigung der Membran war (siehe Abbildung 2.3).

Zwischen der Druckkammer und der Sensoraufnahme auf der Unterseite befand sich eine 1 mm dicke Schicht aus PVC, die beide voneinander trennte. Durch diese Schicht wurde mittig ein 4 mm großes Loch gebohrt, das beide Becher miteinander verband.

Von der Druckkammer aus führte ein dünner Kanal (1 mm Durchmesser, 15 mm Länge) zu einem mechanischen Ventil, das ebenfalls auf der Oberseite der Grundplatte in die Sensorbasis integriert war und zum Druckausgleich während der Befüllung der Druckkammer genutzt wurde.

Für die Membran wurden je nach Ausleseeinheit unterschiedliche Materialien gewählt. Welche wann genutzt wurden wird in den beiden folgenden Abschnitten für die jeweilig verwendete Ausleseeinheit erläutert. Um die Membran luftdicht zu befestigen befand sich an der Decke des Bechers für die Sensoraufnahme eine 1 mm dicke Gummidichtung, ebenfalls mit einem 4 mm großen Loch in der Mitte. Dieses Loch passte genau über das Loch, das die Druckkammer mit der Sensoraufnahme verband, so dass dieses durch die Gummidichtung nicht verschlossen wurde. Auf der Dichtung wurde anschließend eine flexible Membran positioniert, die das Loch verschloss. Eine Auslenkung dieser Membran konnte von der Ausleseeinheit gemessen werden.

Je nach verwendeter Ausleseeinheit wurden unterschiedliche Pressstempel genutzt.

Die Stempel wurden mithilfe einer Presskapsel auf die Membran gepresst, um diese zu fixieren. Die Unterschiede werden in den beiden folgenden Abschnitten im Einzelnen beschrieben.

### 2.2.1.2.1. Anpassungen der Sensorbasis an den kapazitiven Wegaufnehmer als Ausleseseinheit

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wurde als eine der untersuchten Ausleseeinheiten ein kapazitiver Wegaufnehmer genutzt (Modell 4810 mit einem 2803-Sensorkopf,  $\pm 5 V$  vom 0-Punkt  $\hat{=}$   $\pm 50 \mu m$  vom 0-Punkt,  $1000 Hz$  Samplingrate, Auflösungsvermögen  $6.64 nm$ , Firma ADE Technologies (heute MicroSense), (USA)). Auch hier wurde wieder eine elektrisch leitende ESD-Folie als Membran verwendet.

Eine schematische Darstellung des Sensors mit Wegaufnehmer ist in Abbildung 2.3 zu finden.

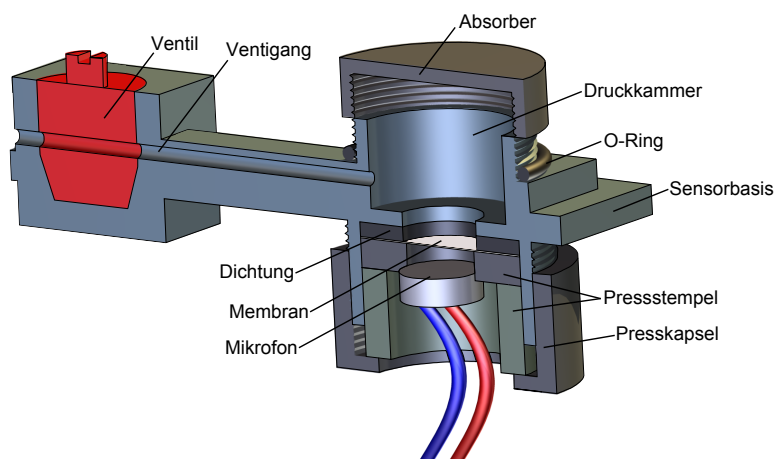
Der Pressstempel lässt sich funktionell in zwei Teile trennen: einen ringförmigen Abstandshalter ( $13 \times 6 \times 1 mm$   $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) aus Kupfer, der direkt auf der Membran auflag und für eine große Anpressfläche sorgte, und einen ebenfalls kupfernen Hohlzylinder ( $10 \times 8 \times 13 mm$   $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ), der als Verbindung zwischen dem Abstandshalter und der Presskapsel fungierte und zudem als Führung und Halterung für den kapazitiven Wegaufnehmer diente. Beide Teile waren zu einem Werkstück kombiniert. Da der Pressstempel elektrisch leitend war, konnte die Membran direkt über die Hülle des kapazitiven Wegaufnehmers geerdet werden. Für jede neue Befüllung wurde der Wegaufnehmer aus der Halterung entfernt und der Sensor konnte in einer Befüllkammer befüllt werden (siehe Abschnitt 2.2.2.3). Zur Messung der Membranauslenkung wurde der kapazitive Wegaufnehmer wieder in die Halterung eingeführt und in einem Abstand von etwa  $50 \mu m$  händisch vor der Membran positioniert. Die Einhaltung des gewünschten Abstandes wurde durch eine relative Abstandsanzeige auf der Kapazität/Digital-wandelnden Einheit des Wegaufnehmers erleichtert.

### 2.2.1.2.2. Anpassungen der Sensorbasis an das Elektret-Mikrofon als Ausleseseinheit

Zum Messen der Ausdehnung des Sensorfluids in der Druckkammer wurden auch Elektret-Kondensator-Mikrofone benutzt. Diese hatten den Vorteil mit einem Preis von wenigen Euro pro Stück sehr kostengünstig zu sein und waren zudem jederzeit über das Internet verfügbar. Sie bestanden, ähnlich wie die Ausleseeinheiten aus dem FZ caesar (siehe Abschnitt 3.2.1), aus einer flexiblen

Membran, die Teil eines Plattenkondensators war.

Durch die Auslenkung der Kondensatormembran änderte sich die Kapazität des Systems. Diese Änderung wurde mithilfe eines Feldeffekttransistors (*FET*) in eine Spannungsänderung umgewandelt. Da die verwendeten Elektret-Mikrofone nicht



**Abbildung 2.4.:** Schematische Darstellung des Sensors mit Absorber, Sensorbasis mit Ventil und einem Elektret-Mikrofon als Ausleseeinheit

wasserfest waren (KPCM-G60H15C33-44DB-1176, Firma Kepo Electronic Co. Ltd., (Taiwan)), konnte die Mikrofonmembran nicht direkt genutzt werden, um die Ausdehnung des Sensorfluids in der Druckkammer zu messen. Stattdessen wurde die in Abschnitt 2.2.1.2 erwähnte Membran unter der Druckkammer angebracht. Die folgenden Beschreibungen des Aufbaus der Mikrofonhalterung sind in Abbildung 2.4 zusammen mit dem Aufbau der Sensorbasis dargestellt.

Zur Befestigung des Mikrofons und zum Anpressen der Membran wurde ein kombinierter Mechanismus genutzt. Die Membran wurde über einen Presstempel an die Sensorbasis gepresst. Dieser Presstempel bestand aus einem Hohlzylinder und einem darunter liegenden Kunststoffring, der auf der Membran auflag. Durch das Verschrauben der Presskapsel mit der Sensorbasis drückte die Kapsel auf den Hohlzylinder, der wiederum den Kunststoffring fest gegen die die Sensorbasis presste und so die Membran fixierte. Der Kunststoffring hatte einen Außendurchmesser von 13 mm, einen Innendurchmesser von 6 mm und eine Höhe von 2 mm, und passte somit genau in die Sensoraufnahme auf der Unterseite der Sensorbasis. In den Ring konnte passgenau das Elektret-Mikrofon eingesetzt und auf der Oberseite des Ringes mit diesem verklebt werden (Pattex Stabilix Express, Firma Henkel AG

**Tabelle 2.1.:** Membranmaterialien der Elektret-Mikrofon-Versuche

Material	Firma
Latex 40 $\mu m$	Durex Kondom, Firma Reckitt Benckiser Deutschland GmbH, (Deutschland)
Latex 50 $\mu m$	Durex Kondom, Firma Reckitt Benckiser Deutschland GmbH, (Deutschland)
PE 11 – 14 $\mu m$	Frischhaltefolie, Firma REWE Markt GmbH, (Deutschland)
PU 25 $\mu m$	Platilon, Firma Bayer MaterialScience AG, (Deutschland)
PVC-U 50 $\mu m$	Firma Pütz GmbH+Co. Folien KG, (Deutschland)
PVC-U 80 $\mu m$	Firma Pütz GmbH+Co. Folien KG, (Deutschland)

& Co. KGaA, (Deutschland)). Das Mikrofon wurde durch diesen Aufbau von der Membran vor dem Fluid in der Druckkammer geschützt. Zwischen der Membran und dem Mikrofon bestand ein etwa 1.5 mm tiefer, luftgefüllter Hohlraum, der durch die Klebung hermetisch abgeschlossen war.

Durch die Ausdehnung des Fluids wurde die Kunststoffmembran ausgelenkt und der dadurch erzeugte Luftdruckimpuls konnte vom Mikrofon aufgenommen werden. Über Markierungen am Gehäuse und dem Presskapsel wurde versucht, die Membran immer gleich fest zu spannen. Zur Evaluation der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, der Kompatibilität mit allen zu testenden Fluiden, und der Stärke der Sensorantwort wurden verschiedene Folien getestet (siehe Tabelle 2.1). Zur Spannungsversorgung wurde das Mikrofon an ein Labornetzteil mit 3 V Spannung angeschlossen.

Durch den kombinierten Mechanismus zur Befestigung der Membran und des Mikrofons konnte dieses nicht vor jeder neuen Befüllung des Sensors ausgebaut werden, ohne die Membranspannung zu verändern. Aus diesem Grund wurde die Befüllkammer so entwickelt, dass die Sensorunterseite mit dem Mikrofon während der Befüllung nicht mit dem Fluid in der Befüllkammer in Kontakt kam (siehe 2.2.2.3).

### 2.2.1.3. Aufbau der für die Sensoren genutzten absorbierenden/IR-transmittierenden Einheiten

In diesem Abschnitt sollen die absorbierenden/IR-transmittierenden Einheiten, im Folgenden Absorber oder IR-transmissives Fenster genannt, vorgestellt werden.

Für die Herstellung der Absorber wurden Becher aus  $4 \times 15 \text{ mm}$  ( $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) großen Werkstücken des gewünschten Absorbermaterials gefräst (13 mm  $\varnothing_{\text{innen}}$ ). Die Tiefe des Bechers bestimmte gleichzeitig die Absorberschichtdicke und betrug zwischen 3 mm und 3.8 mm für Absorberschichtdicken zwischen 1 mm und

0.2 mm. Auf der Innenseite wurden über die gesamte Tiefe der Becher Gewinde eingebracht ( $M13 \times 0.5 \text{ mm}$ ). Über das Gewinde am Absorber und an der Sensorbasis ließen sich die Absorber mit der Sensorbasis verschrauben. Die in Tabelle 2.2 aufgeführten Materialien wurden als Absorber genutzt.

**Tabelle 2.2.:** Verwendete Absorbermaterialien

Material	Firma
PVC	Trovitur PVC-U, Firma Röchling SE & Co. KG, (Deutschland)
PVC Folien	PVC-U, Firma Pütz GmbH+Co. Folien KG, (Deutschland)
PE	PE 300, Firma Auer Kunststofftechnik GmbH & Co. KG, (Deutschland)
CFRP	Firma CG TEC GmbH, (Deutschland)
PEEK-HPV	Ketron, PEEK-HPV, Firma Quadrant Plastic Composites GmbH, (Deutschland)
Kupfer	ETP-Kupfer, Firma Unbekannt
IR-trans. Fenster	Herasil, Firma Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG, (Deutschland)
FullCure720	Auch RGD720, Firma Stratasys Ltd., (USA)

Die thermomechanischen Eigenschaften der genutzten Materialien sind in Tabelle 2.6 angegeben.

Das **IR-transmissive Fenster** bestand aus einer kreisrunden Scheibe aus IR-transmissivem Quarzglas mit einem Außendurchmesser von 15 mm und einer Dicke von 1 mm. Dieses wurde mit Kleber (Pattex Stabilix Express, Henkel AG & Co. KGaA) auf einen  $15 \times 13 \times 3 \text{ mm}$  ( $\varnothing_{\text{außen}} \times \varnothing_{\text{innen}} \times \text{Höhe}$ ) messenden Gewindingring mit einem  $M13 \times 0.5 \text{ mm}$  Innengewinde geklebt. Zusammen formte dies einen Becher, der wie die anderen Absorber auf die Sensorbasis geschraubt werden konnte.

Das gleiche Prinzip wurde auch für die Herstellung von dünnen **PVC-Absorbern aus Folie** genutzt. Hier wurden PVC-U Folien mit einer Dicke von 0.12 mm, 0.2 mm und 0.4 mm auf Gewindinge geklebt (Pattex Stabilix Express).

Die Absorber aus FullCure720 wurden inklusive dem  $M13 \times 0.5 \text{ mm}$  Gewinde mit einem 3D-Drucker gedruckt (Eden 260V, Firma Objet (heute Stratasys Ltd.), (USA)). Für einen Teilversuch der Versuchsreihe „Einfluss der Schichtdicke von verschiedenen Absorbern auf die Wärmeverteilung“ musste eine **Anpassung der FullCure720-Absorber an dünne Schichtdicken** vorgenommen werden. Anstatt der üblichen glatten inneren Absorberfläche wurden hier zwei rechtwinklig gekreuzte Verstärkungsstreben eingebracht. Diese hatten eine Höhe und Breite von je 0.5 mm und reichten jeweils von einem Rand diagonal zum anderen. Um eine Verzerrung der Messergebnisse durch die zusätzliche thermische Masse der Streben

auszuschließen, wurde nicht nur der 0.2 *mm* dicke Absorber, sondern auch der 0.5 *mm* und der 1 *mm* dicke Absorber mit den Verstärkungsstreben ausgestattet.

### 2.2.2. Methoden

#### 2.2.2.1. Der Versuchsaufbau

Als Infrarotquelle für die Versuche diente ein Schwarzkörperstrahler (CS500, Firma DIAS Infrared, (Deutschland)) der in allen Versuchen mit einer Temperatur von 500 °C in einem Abstand von 26 *cm* zum Absorber betrieben wurde. Dies führte zu einer Infrarotintensität von 260  $W/m^2$  bzw. von 46 *mW* auf der Absorberfläche. Die Verteilung der IR-Energie über die Wellenlängen von 0.5 – 16  $\mu m$  wurde für 500 °C in Abschnitt 1.1.1 in Abbildung 1.1A bereits grafisch dargestellt. Die Wellenlänge mit maximaler Energie ( $\lambda_{max}$ ) liegt bei 3.75  $\mu m$ . Der dem Schwarzkörperstrahler zugewandte Sensor wurde auf Höhe der Öffnung des Strahlers justiert. Hierfür wurde er auf einem Aluminiumblock fixiert, der sich auf einem schwingungsgedämpften Tisch befand.

Zur Modulation der IR-Strahlung wurde ein Chopper (2 Slot Chopper Blade, Controller MC1000 Thorlabs GmbH, (Deutschland)) genutzt. Da die Elektret-Mikrofone und der kapazitive Wegaufnehmer gegen einstreuende Fremdkapazitäten besser abgeschirmt waren als die Sensoren aus dem FZ caesar, konnte der Chopper in einem Abstand von 3.5 *cm* zum Sensor positioniert werden. Dies verhinderte eine starke Erwärmung des Choppers durch IR-Strahlung und schonte dessen Elektronik. In Tabelle A.1 im Anhang sind die jeweiligen Expositionszeiten und Strahlungsintensitäten für die Frequenzen von 1 – 15 *Hz* angegeben. Während für die Versuche zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse Modulationsfrequenzen von 1 – 15 *Hz* genutzt wurden, wurde in den anschließenden Versuchen nur eine Modulationsfrequenz von 1 *Hz* genutzt.

#### 2.2.2.2. Signaldigitalisierung, Datenaufnahme und -auswertung

Die mit dem kapazitiven Wegaufnehmer oder den Elektret-Mikrofonen aufgenommenen Daten wurden über ein DAQ-System (Micro 1401 mkII, Firma Cambridge Electronic Design Limited (CED), (England)) mit dazugehöriger Software (Spike2, Version 5) digitalisiert und auf dem Computer gespeichert. Die genutzte Abtastrate des CED betrug 1000 *Hz*.

Mithilfe der Spike2-Software wurden die Daten geglättet (Zeitkonstante 0.05 *s*). Im Falle des kapazitiven Wegaufnehmers wurde zudem noch ein DC-Remove (Zeitkonstante 1 *s*) auf die Daten angewandt, bevor diese als Textdatei zur weiteren



Datenauswertung exportiert wurden. Im Falle des Elektret-Mikrofons fungierte der eingebaute FET bereits als DC-Remove, so dass dieser nicht mehr durch die Software Spike2 durchgeführt werden musste.

Jede Messreihe bestand, soweit nicht anders angegeben, aus einer 25 Sekunden langen Einschwingphase, bis der Chopper sich auf die gewünschte Frequenz eingestellt hatte. Darauf folgte eine Messung des Sensorsignals über 100 Perioden der eingestellten Frequenz und anschließend eine 50 Sekunden dauernde Rauschmessung, von der die ersten 25 Sekunden und die letzten fünf Sekunden aufgrund von Störungen durch den Chopper verworfen wurden. Die Rauschmessungen wurden, genau wie die Messdaten der IR-Expositionen, mit einer Glättung und im Falle des kapazitiven Wegaufnehmers mit einem DC-Remove bearbeitet, bevor diese ebenfalls als Textdatei zur weiteren Datenauswertung in MATLAB exportiert wurden.

Die Datenauswertung wurde mithilfe eines MATLAB-Skripts automatisiert. Zur Ermittlung der Peak-to-Peak-Amplitude wurde für jede Chopperperiode der Betrag des Maximal- und des Minimalwerts ermittelt und diese addiert. Anschließend wurden die Peak-to-Peak-Amplituden der gesamten Datenreihe gemittelt. Zusätzlich wurden die Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  und das Signal-to-Noise-Ratio (siehe Abschnitt 1.1.1) berechnet.

Für einen anschließenden Vergleich zwischen den verschiedenen Sensorkonfigurationen des jeweiligen Experiments wurden die ermittelten Daten mithilfe eines Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung überprüft und, da die Daten nie normalverteilt waren, mit einem Kruskal-Wallis-Test auf signifikante Unterschiede getestet.

Die Ergebnisse werden meist in Form eines Boxplots angegeben. Hierbei zeigen die obere und untere Begrenzung der Box das obere und untere Quartil (25% und 75%) an, der horizontale Strich in der Box den Median. Die Whisker zeigen das 1.5-Fache des Interquartilsabstands, die Kreuze zeigten Ausreißer außerhalb der Whisker an. Als Grundlage für die Boxplots wurden alle ermittelten Peak-to-Peak-Amplituden der jeweiligen Sensorkonfiguration aus dem Experiment genutzt.

### 2.2.2.3. Befüllung des Sensors

Um den Sensor blasenfrei mit Luft zu befüllen, wurde eine spezielle Halterung angefertigt, in der der Sensor fixiert werden konnte (siehe Abbildung 2.5A). Mit dieser Halterung war es möglich den Sensor zu befüllen, ohne ihn vollständig unterzutau-chen. Dies war notwendig, um die fest eingebauten Elektret-Mikrofone nicht durch einen Kontakt mit dem Fluid zu beschädigen.

Die Halterung war zylindrisch mit einem Durchmesser von 10 *cm* und einer Höhe von 9 *cm*. Um den Sensor während der Befüllung von unten zugänglich zu machen,

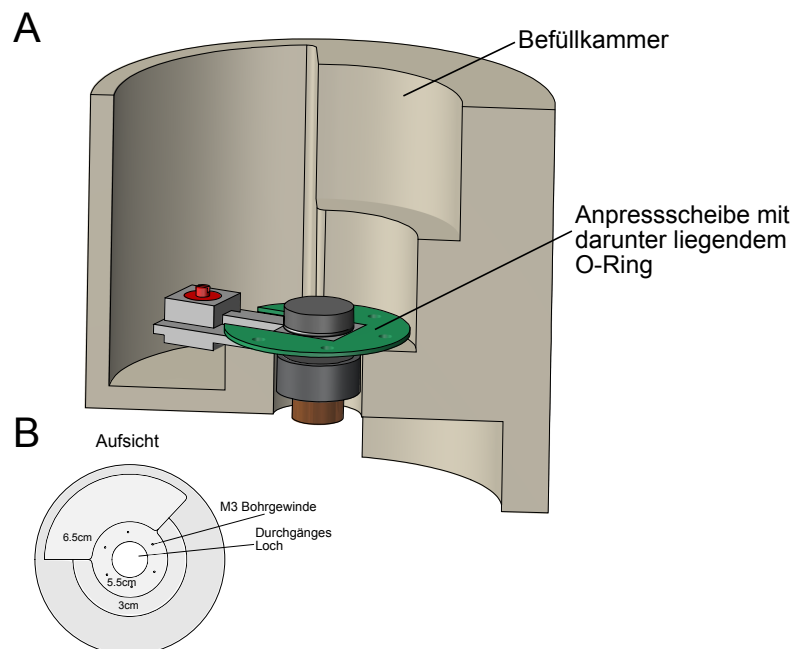
## Kapitel 2. Material und Methoden

---

wurde der Boden des Zylinders zunächst 2 cm tief mit einem Durchmesser von 8 cm eingefräst und etwa 40% des hieraus entstandenen Randes entfernt. Hierdurch stand die Halterung 2 cm erhöht, und es gab von unten einen Zugriff auf die Ausleseeinheit.

Von oben wurde zunächst ein Zylinder mit einem Durchmesser von 4 cm und einer Tiefe von 5.5 cm aus dem Werkstück herausgefräst (siehe Abbildung 2.5B). Das entstandene Loch wurde auf den obersten 3 cm um ein kreisrundes Loch mit einem Durchmesser von 6 cm erweitert um einen besseren Zugriff zu erhalten. Anschließend wurde ein Kreisabschnitt (1/3 Gesamtkreis) mit 9 cm Durchmesser und einer Tiefe von 6.5 cm aus dem Block herausgefräst um Platz für das Ventil zu schaffen. Diese Bauweise führte gleichzeitig auch zu einer Reduzierung der benötigten Flüssigkeitsmenge, die zum Befüllen des Sensors nötig war.

In der Mitte wurde ein Loch mit einem Durchmesser von 18 mm gebohrt, in das der Sensor gesteckt werden konnte.



**Abbildung 2.5.:** A) Schematische Darstellung eines Querschnitts durch die Befüllkammer mit eingesetztem Sensor; B) Aufsicht auf die Befüllkammer ohne Sensor, die Zahlen geben die Tiefe der jeweiligen Stelle an.

Um den Sensor zu befüllen wurde er, wie in Abbildung 2.5A exemplarisch für einen Sensor mit integriertem Ventil gezeigt, in die Befüllkammer eingebracht und mit einer Anpressscheibe mittels M3-Schrauben am Boden der Kammer wasserdicht fixiert. Die Anpressscheibe drückte hierfür einen O-Ring, der um die Presskapsel des

Sensors angebracht wurde, fest gegen den Boden der Befüllkammer. Der Absorber wurde auf dem Boden der Befüllkammer positioniert. Anschließend wurde die Kammer mit Flüssigkeit gefüllt.

Um den - durch das Verschrauben des Absorbers mit der Sensorbasis entstehenden - Überdruck in der Druckkammer gar nicht erst entstehen zu lassen, wurde bei der Verwendung eines Sensors mit integriertem Ventil nach dem Befüllen der Kammer das Ventil geöffnet. Um sicherzustellen, dass sich keine Luftblasen im Ventilgang oder den Gewinden des Absorbers und der Sensorbasis befanden, wurden diese mithilfe einer feinen Kanüle mit der genutzten Flüssigkeit durchgespült. Danach konnte der Absorber vorsichtig und ohne ihn aus der Flüssigkeit zu heben auf der Sensorbasis platziert und festgeschraubt werden. Anschließend wurde das Ventil (wenn vorhanden) geschlossen, das Fluid aus der Befüllkammer entfernt und der Sensor aus der Kammer entnommen.

Eine Liste der genutzten Sensorfluide ist in Tabelle 2.3 zu finden. Die thermomechanischen Materialwerte der getesteten Fluide sind in Tabelle 2.6 aufgeführt.

**Tabelle 2.3.:** Liste der genutzten Sensorfluide mit Herstellerangabe

Name des Fluids	Angaben zum Hersteller
destilliertes Wasser	Destilliert mit Merck Millipore Direct-Q S, 0.22 $\mu\text{m}$ Filter Millipak express, (Deutschland).
Luft	Raumluft
Silikonöl B10	Der Firma Elbe Silikone, L. Böwing GmbH, (Deutschland).
GWG-50%	50%iges Glycerol-Wasser-Gemisch bestehend aus Wasser (1) und Glycerol ( 98%, wasserfrei) der Firma Carl Roth, (Deutschland).
Novec7100	Novec7100 ist ein Hightechfluid der Firma 3M, (Deutschland).

### 2.2.2.4. Beschichtung der Absorber

Als Material zur Beschichtung der Absorber wurde Grafit (Graphit 33, CRC Industries Deutschland GmbH, (Deutschland)) gewählt. In Ermangelung eines vom Hersteller zur Verfügung gestellten Materialdatenblattes wurden die Transmissionseigenschaften von Grafit Mellouki et al. (2007) entnommen, als Referenz für die Reflexion wurde Baldrige et al. (2009) genutzt. Für das  $\lambda_{max}$  von 3.7  $\mu\text{m}$  des hier genutzten Versuchsaufbaus liegt die Reflexion bei ca. 7%, die Transmission bei etwa 0% und die Absorption dementsprechend bei etwa 93%. Da

für Transmissivität nicht explizit die Schichtdicke der Grafits angegeben ist, wird davon ausgegangen, dass es sich um die gleiche maximale Schichtdicke von  $10\ \mu\text{m}$  wie bei den elektrischen Messungen im gleichen Paper handelt und somit auch für die hier genutzten dickeren Schichtdicken gilt.

### Teil 1: Einfluss Beschichtungsdicke

Um mögliche negative Einflüsse eines erneuten Befüllens des Sensors auf die Messergebnisse auszuschließen, wurde nur eine Befüllung über die gesamte Messdauer genutzt. Zunächst sollte der Einfluss unterschiedlicher Schichtdicken der Graphitbeschichtung auf die Messergebnisse untersucht werden. Es wurde immer erst eine Schicht aufgetragen, dann zehn Minuten gewartet bis die Beschichtung getrocknet war und dann gemessen. Anschließend wurde eine weitere Schicht aufgetragen, wieder gewartet und dann gemessen. Schließlich wurde eine dritte Schicht aufgetragen, gewartet und gemessen. Abschließend wurden alle Schichten mit Alkohol entfernt und der Beschichtungsvorgang drei weitere Male wiederholt. Es wurden insgesamt vier Messungen pro Schichtdicke aufgenommen.

### Teil 2: Vergleich zwischen beschichtet und unbeschichtet

Um den Einfluss einer Beschichtung der Absorber auf die Messergebnisse zu untersuchen, wurde jeweils nur ein Absorber eines Materials für diesen Versuch beschichtet. Für CFRP, Kupfer und PEEK-HPV, also die Absorber mit besonders hoher Wärmeleitung, wurde eine Absorberschichtdicke von  $0.5\ \text{mm}$  gewählt, für die Absorber mit hohem thermischem Ausdehnungskoeffizienten, also PVC, PE, und FullCure720 wurde eine Absorberschichtdicke von  $1\ \text{mm}$  gewählt (siehe Tabelle 2.6). Da das IR-transmissive Fenster nur in Schichtdicke von  $1\ \text{mm}$  vorhanden war, wurde diese verwendet.

Für das IR-transmissive Fenster als „Absorber“ wurden zwei verschiedene Konfigurationen getestet. Für eine Versuchsreihe wurde das IR-transmissive Fenster mit Graphit beschichtet. In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Wasser mit einem zusätzlichen Absorber versetzt um dessen Absorption zu erhöhen. Aufgrund der Wasserunlöslichkeit des Graphitsprays wurde stattdessen schwarze Tinte verwendet, um das Wasser zu schwärzen. Hierfür wurde das Wasser mit Tinte in einem Verhältnis von 10:1 vermischt ( $30\ \text{ml}$  Tinte (Tinte 4001 Billiant-Schwarz, Pelikan Vertriebsgesellschaft mbH & Co. KG, (Deutschland)) auf  $300\ \text{ml}$  destilliertes Wasser).

Auch hier wurde, um mögliche negative Einflüsse eines erneuten Befüllens des Sensors auf die Messergebnisse auszuschließen, je Absorber nur mit einer einzigen Befüllung gearbeitet und nur die Beschichtung neu aufgebracht bzw. wieder entfernt. Für die Sensorkonfiguration mit Tinte im Wasser wurde die Messung fünfmal wiederholt.

### 2.2.2.5. Messung der Absorber- und Basisausdehnung

Da der kapazitive Wegaufnehmer immer gegen eine geerdete, elektrisch leitende Oberfläche messen muss um den Abstand zu bestimmen, wurden der 1 *mm* und 0.5 *mm* dicke PVC-Absorber auf der Innenseite mit einer circa 25 *nm* dicken Silberschicht beschichtet (Sputter 8SCD 040, Fa. Balzers Union, (Liechtenstein)) und somit elektrisch leitend gemacht. Die Halterung für die Absorber bestand aus Blech und Aluminium, so dass die Absorber über den schwingungsgedämpften Tisch geerdet wurden. Für die Messungen der Ausdehnung der Sensorbasis mit Ventil wurde die Ausdehnung der Membran gemessen, die im nicht strahlungsexponierten Zustand nur die Bewegung der Basis abbilden sollte.

Ansonsten waren Versuchsaufbau und -ablauf wie in den Abschnitten 2.2.2.1 und 2.2.2.2 beschrieben. Die Ausdehnung jedes beschichteten Absorbers wurde fünfmal hintereinander gemessen. Anschließend wurde die Sensorbasis ohne aufgeschraubten Absorber fünfmal hintereinander der Strahlung exponiert. Für die Beschattung der Membran wurde ein passend geschnittenes Stück weißes Papier (80 *g/m*<sup>2</sup> ISO100 Weiße, EvolutionWhite, Firma Steinbeis, (Deutschland)) vorsichtig in den Sensor eingebracht, so dass die Membran nicht mehr der Strahlung exponiert, aber thermisch nicht von der Umgebung isoliert war.

### 2.2.2.6. Messen der Absorbtemperatur

Um die Temperatur der Innenseite der strahlungsexponierten Fläche des Absorbers zu messen, wurde in einen Sensor mit Sensorbasis ohne Ventil durch ein 1 *mm* großes Loch in der Seite ein Temperaturfühler (TJC100-CASS-IM050, Firma OMEGA Engineering inc. (USA)) in die Druckkammer eingeführt. Die flexible Spitze des Temperaturfühlers wurde so gebogen, dass sie direkt an der Innenseite der 0.2 *mm* dicken Absorberschicht aus PEEK-HPV anlag. Zum besseren Wärmeübertrag wurde an der Kontaktstelle Wärmeleitpaste aufgebracht. Der Sensor war für diese Messung nur mit Luft gefüllt und hatte keine eingebaute Membran.

Der Temperaturfühler wurde über einen Spannungswandler (4K-TH-BNC, Firma Institut für Explorative Datenanalyse (IED), (Deutschland)) an das in Abschnitt (2.2.2.2) beschriebene DAQ-System angeschlossen und die aufgenommenen Daten über die Spike2 Software visualisiert. Die Messung wurde mit einer Bestrahlungsintensität von 46 *mW* am Absorber und einer Modulationsfrequenz von 1 *Hz* mit dem in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Schwarzkörperstrahler und Chopper durchgeführt.

### 2.2.2.7. Berechnen der Absorbererwärmung durch IR-Absorption

Da sich die genaue Erwärmung des Absorbers nur anhand von komplexen Simulationen bestimmen lässt, sollte die Erwärmung näherungsweise für eine vereinfachte Geometrie berechnet werden. Als absorbierende Fläche wurde eine zylindrische Platte ( $r = 7.5 \text{ mm}$ ,  $h = 1 \text{ mm}$ ) angenommen. Da nur bei Kupfer aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit eine Erwärmung des Absorbers über dieses Volumen hinaus zu erwarten ist, sollte dies die Erwärmung für alle anderen Absorber hinreichend gut abbilden. Tatsächlich wurde durch die Strahlung wahrscheinlich eine sehr viel geringere Schichtdicke im Absorber erwärmt, die die Wärme dann weiterleitete.

Die IR-Strahlung hatte eine Intensität von  $0.046 \text{ W}$  am Absorber. Da in den Experimenten die Strahlung mit  $1 \text{ Hz}$  gehoppert wurde, fand der maximale Energieeintrag in den Absorber nach  $0.5$  Sekunden statt; da  $\text{Watt} = \text{J/s}$  ist, betrug der Energieeintrag also innerhalb einer halben Sekunde  $0.046 \cdot 0.5 = 0.023 \text{ J}$ .

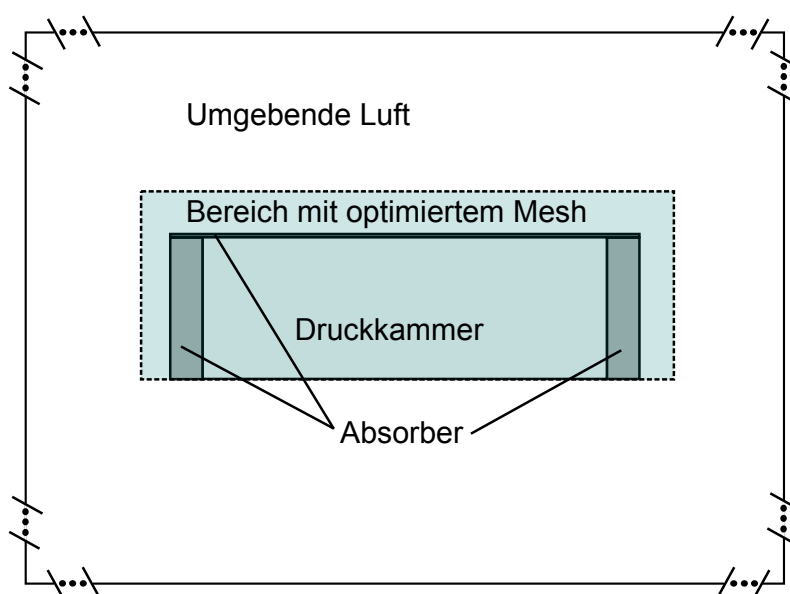
Um die Erwärmung zu berechnen wurde die Formel zur Ermittlung der Wärmekapazität umgestellt. Aus  $c_p = Q/\Delta T \cdot m$  wird  $\Delta T = Q/c_p \cdot m$  (mit  $\Delta T =$  Temperaturänderung,  $m =$  Masse und  $c_p =$  spezifische Wärmekapazität). Die Masse entspricht der Dichte des Stoffes multipliziert mit dem Volumen des Absorbers. Als Materialparameter wurden die Werte aus Tabelle 2.6 genutzt. Da keine Literaturwerte zur Verfügung standen, wurde für FullCure720 eine Wärmekapazität von  $1.5 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  und für PEEK-HPV eine Wärmekapazität von  $1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  angenommen.

### 2.2.2.8. Simulation und Berechnung der maximalen Gesamtausdehnung des Sensors

Für die Simulation mit COMSOL-Multiphysics wurde ein 2D-Modell entworfen, auf das das Modul „Wärmetransport in Feststoffen“ angewandt wurde. Dieses Modul bildete die Wärmeleitung in Fluiden zwar nicht optimal ab, da die Wärme jedoch im Feststoff „entstand“, wurde dieses Modul gewählt. Es wurde ein zeitabhängiger Löser gewählt, mit dem der Verlauf der Temperaturänderung über alle berechneten Zeitschritte zu beobachten war. Es wurde eine zeitliche Auflösung von  $0.01$  Sekunden gewählt, um Ungenauigkeiten durch zu große Zeitschritte zu vermeiden. Das geometrische Modell bestand aus Absorberquerschnitt mit  $15 \text{ mm}$  Außendurchmesser,  $13 \text{ mm}$  Innendurchmesser und einer Höhe der Druckkammer von  $4.5 \text{ mm}$  und zusätzlich der Schichtdicke des jeweils simulierten Absorbers (siehe Abbildung 2.6). Da Vorversuche gezeigt haben, dass die Wärme nie bis zum Ende der Kammer vordrang, wurde hier nicht die reale Kammertiefe von  $9 \text{ mm}$  simuliert, um den Rechenaufwand zu minimieren.

Um den Absorber herum wurde ein nach oben hin  $+1.5 \text{ mm}$ , nach unten  $+0 \text{ mm}$  und am Rand  $+0.5 \text{ mm}$  großes Rechteck gelegt, in dem das Mesh deutlich verfeinert

wurde. Dies sollte die Genauigkeit der Simulation in den Bereichen erhöhen, in denen es zu einer Temperaturzunahme kommt. Für das verfeinerte Mesh wurde die maximale Elementgröße, die zur Berechnung genutzt wurde, auf  $0.3\text{ mm}$  gesetzt, die minimale auf  $1 \cdot 10^{-6}\text{ mm}$ . In dem oben genannten Bereich wurde der Parameter für die Verfeinerung, also die „Anzahl der Verfeinerungen“, auf drei gesetzt.



**Abbildung 2.6.:** Schematische Skizze des Simulationsmodells, der farblich hinterlegte Bereich zeigt den Bereich mit optimierten Mesh an.

Zudem wurde um den Absorber herum eine in jede Richtung  $3\text{ cm}$  breite Luftschicht simuliert, um die realen Bedingungen für den Wärmetransport möglichst wirklichkeitsnah abzubilden. Durch die umgebende Luftschicht war der Absorber an keiner Stelle thermisch isoliert und konnte die Wärme entweder im eigenen Material weiterleiten oder in die Druckkammer beziehungsweise in die umgebende Luft ableiten. Die Ausgangstemperatur für alle Elemente des Modells lag bei  $293.15\text{ K}$ .

Aufgrund der in Abschnitt 2.2.2.7 erläuterten Punkte sind die berechneten Temperaturzunahmen im Absorber aus Abschnitt 3.3.4 nur als Näherung zu sehen und nicht als Grundlage für die Simulation geeignet. Um abschätzen zu können was bei einer hypothetisch ähnlichen Temperaturzunahme in den Absorbern passiert, wurde für die Simulationen eine Temperaturzunahme von  $+1\text{ K}$  angenommen. Hierdurch konnte die potentielle Fehlerquelle eliminiert werden, die durch die sehr grobe Berechnung der Temperaturzunahmen aus Abschnitt 3.3.4 entstand. Durch die konstante Temperaturerhöhung für alle Materialien blieben die Simulationen für verschiedene Schichtdicken bei gleichem Absorbermaterial untereinander vergleichbar; ein Ver-

gleich zwischen den verschiedenen Materialien war jedoch nicht direkt möglich. Die Temperaturzunahme wurde an der Grenzschicht zwischen Absorber und Luft simuliert um eine dortige Absorption der Strahlung und eine daraus resultierende Wärmeentwicklung zugrunde zu legen. Durch das Choppern der IR-Strahlung entstand die Temperatur im Experiment nicht plötzlich, sondern nahm gepulst zu und wieder ab. Daher wurde in den Simulationen ein Dreieckreiz für die Erwärmung des Absorbers genutzt, der nach 0.5 Sekunden sein Maximum erreichte, ähnlich wie bei einer Chopperung der Strahlung mit 1  $Hz$  im realen Versuch.

Die verwendeten Materialdaten aller simulierten Absorber und Fluide sind in Tabelle 2.6 in Abschnitt 2 angegeben.

### 2.2.2.8.1. Simulationskonfiguration zur Simulation des IR-transmissiven Fensters

Für die Simulation des IR-transmissiven Fensters mit und ohne Grafitbeschichtung musste das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Modell geringfügig modifiziert werden.

In Klocke et al. (2011) konnte anhand der Simulation einer mit Wasser gefüllten Druckkammer gezeigt werden, dass die IR-Strahlung innerhalb der ersten 50  $\mu m$  vollständig absorbiert wird. Dementsprechend ist dort die stärkste Temperaturerhöhung zu erwarten. Um die in Klocke et al. (2011) gezeigte Wärmegrenzflächenbildung zu simulieren, wurde bei den Simulationen ohne eine Beschichtung des Fensters die Wärme auf die Grenzschicht zwischen dem Wasser in der Sensorkammer und dem IR-transmissiven Fenster appliziert. Dies sollte vereinfacht die IR-Transmissivität des Fensters simulieren, wobei die Wärme durch die Absorption der IR-Strahlung direkt im Fluid entstand.

Für die Simulationen einer Grafitbeschichtung des IR-transmissiven Fensters wurde eine 0.1  $mm$  dicke Grafitschicht in Form eines dünnen Rechtecks mit den Maßen  $15 \times 0.1 mm$  (Breite  $\times$  Höhe) auf das Fenster gelegt. Bei diesen Simulationen wurde die Wärme auf die äußere Grenzschicht des Absorbers zur umgebenden Luft hin appliziert, also auf die Grenze zwischen Grafit und Luft. Für das in den Experimenten verwendete Grafit lag kein Produktdatenblatt vor, so dass stattdessen Werte aus dem COMSOL-Material-Browser genutzt wurden.

### 2.2.2.9. Test auf Eignung der Sensorfluide

Für die Untersuchungen zur Eignung von verschiedenen Fluiden als Sensorfüllung wurde der Sensor nach der in Abschnitt 2.2.2.3 beschriebenen Methode mit Novec7100, einem 50%igen Glycerol-Wasser-Gemisch, destilliertem Wasser, Silikonöl



B10 und Luft befüllt.

Für die Versuche wurde der Sensor mit einer Strahlungsintensität von  $46\text{ mW}$  am Absorber und einer Expositionsfrequenz von  $1\text{ Hz}$  untersucht. Wenn nicht anders angegeben wurde ein  $1\text{ mm}$  dicker Absorber aus schwarzem PVC genutzt.

Bevor die Messung gestartet wurde, wurde eine 25 Sekunden lange Einschwingphase abgewartet, danach wurden 400 Sekunden, also 400 Expositionen, aufgenommen, mit einem DC-Remove und Glättungsfilter in der Spike2-Software bearbeitet und für die Analyse in MATLAB exportiert (Filterung und Matlab Analyse siehe Abschnitt 2.2.2.2).

Für die Analyse der Eignung der Sensorfluide wurde jeweils die erste und die letzte der 400 aufgenommenen Peak-to-Peak-Amplituden betrachtet und deren Differenz bestimmt.

Der Sensor wurde je Fluid fünfmal hintereinander mit dem gleichen Fluid gefüllt und anschließend gereinigt, um Verunreinigungen bei den Versuchen mit einem anderen Fluid zu verhindern.

### 2.2.2.10. Aufbau spezielle Golayzelle

Anders als in den meisten anderen Versuchen dieser Arbeit wurde hier eine andere Sensorbasis mit integriertem Ventil gleicher Bauart genutzt, da die aufgebrachte Silberbeschichtung nur schwer entfernbar war. Das Silber wurde mithilfe eines Sputters (SCD 040, Fa. Balzers Union, (Liechtenstein)) auf die Oberfläche der Druckkammer aufgebracht und hatte eine Dicke von etwa  $50\text{ nm}$ . Der Aufbau des Sensors war, bis auf die folgend beschriebenen Unterschiede, identisch zu dem in den anderen Versuchen genutzten Sensor mit Ventil (siehe Abschnitt 2.2.1.2).

Durch die leicht raue Innenseite der Druckkammer war der aufgebrachte Silberspiegel nicht perfekt glatt, die IR-Reflexion war also wahrscheinlich diffus.

Anstatt einer die Membran leicht überlappenden Gummidichtung wurde ein O-Ring genutzt, der auch bei einem festen Anpressen der Membran nicht der Strahlung exponiert war. Hierdurch entstand ein kleiner Hohlraum am Übergang der Sensorbasis zur Membran, in dem sich bei der Nutzung von Flüssigkeiten schnell störende Luftblasen absetzen konnten. Da die meisten Messungen allerdings mit Luft durchgeführt wurden, bestand diese Gefahr hier nicht. Bei der Vergleichsmessung mit Wasser wurde besonders auf Luftblasen geachtet und diese wenn nötig mit einer Spritze entfernt.

Um die Messungen vergleichbar zu gestalten wurde bei der Hinzugabe der Polyester- und Baumwollfasern auf ein gleiches Gewicht der Faserfüllungen geachtet. Das Gewicht der eingebrachten Fasern betrug immer  $0.0075\text{ g}$ . Für einige Messungen wurden die oben genannten Fasern mit Grafit beschichtet. Hierfür wurden diese aus etwa  $30\text{ cm}$  Entfernung von allen Seiten kurz besprüht. So entstand ein dünner

Grafitüberzug, dessen Masse gering war. Die Fasern wurden mit möglichst wenig Kontakt zum IR-transmissiven Fenster in den Sensor eingebracht, damit die Wärme nicht mittels Konduktion direkt an das kalte Fenster abgegeben werden konnte.

Die Abdeckung der Membran wurde mit einem passend geschnittenen Stück weißem Papier ( $80 \text{ g/m}^2$ , ISO100 Weiße, EvolutionWhite, Firma Steinbeis, (Deutschland)) vorgenommen.

Der Sensor wurde jeweils fünfmal neu befüllt, alle Messkonfigurationen wurden hintereinander gemessen. Der weitere Versuchsaufbau, Versuchsablauf und die Messbedingungen waren identisch zu den in Abschnitt 2.2.2.1 und Abschnitt 2.2.2.2 beschriebenen.

Der Sensor wurde in folgenden Konfigurationen gemessen:

- „Normal A“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster und Luftfüllung ohne zusätzliche Modifikationen.
- „Normal B“, Sensor mit durch Papier beschatteter Membran.
- „Versilbert“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luftfüllung und versilberten Innenwänden.
- „Versilbert mit Wasser“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Wasserfüllung und versilberten Innenwänden.
- „Versilbert mit Polyesterfasern“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luftfüllung, versilberten Innenwänden und Polyesterfasern als zusätzlichem Absorber.
- „Versilbert mit Baumwollfasern“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luftfüllung, versilberten Innenwänden und Baumwollfasern als zusätzlichem Absorber.
- „Versilbert mit Polyesterfasern mit Grafit“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luftfüllung, versilberten Innenwänden und mit Grafit beschichteten Polyesterfasern als Absorber.
- „Versilbert mit Baumwollfasern mit Grafit“, Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luftfüllung, versilberten Innenwänden und mit Grafit beschichteten Baumwollfasern als Absorber.

### 2.2.2.11. Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{htc}$

#### Theorie

Der Wärmeübergangskoeffizient, engl. heat-transfer-coefficient (htc), ( $\alpha_{htc}$ ) kann für freie / natürliche Konvektion oder für erzwungene Konvektion berechnet werden.

Während bei der erzwungenen Konvektion eine Strömung im Fluid verursacht wird, zum Beispiel durch eine Pumpe, entsteht die natürliche Konvektion allein durch Druck- bzw. Dichteunterschiede in einem Fluid.

Durch die thermische Ausdehnung eines Teils des Fluids sinkt die Dichte und das Material steigt gegen die Erdanziehungskraft auf, kühlt sich wieder ab und sinkt wieder. Hierdurch kommt es zu einer zirkulären Strömung mit unbekannter Fließgeschwindigkeit im Fluid.

Im untersuchten Sensor kommt es aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen Absorber und Fluid, und aufgrund des Fehlens eines Strömungserzeugers, zu einer natürlichen Konvektion.

Der Wärmeübergangskoeffizient lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\alpha_{htc} = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu(Gr, Pr) \quad (2.1)$$

wobei  $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit [ $W/m \cdot K$ ],  $L$  = Länge der umströmten Fläche [ $m$ ],  $Nu$  = Nusselt-Zahl [-],  $Gr$  = Grashof-Zahl [-] und  $Pr$  = Prandtl-Zahl [-].

Der Term  $Nu(Gr, Pr)$  lässt sich auch in Form eines Potentialsansatzes ausdrücken:

$$Nu = C \cdot Gr^m \cdot Pr^n \quad (2.2)$$

wobei  $C$ ,  $m$  und  $n$  Konstanten sind, die sich nur empirisch für das jeweilige Wärmeübertragungssystem ermitteln lassen und von vielen Faktoren abhängig sind, wie z.B. der Strömungsrichtung oder der Bauart des Wärmeübertragungssystem.

Für die Grashof-Zahl gilt hier:

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \gamma \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (2.3)$$

wobei  $g$  = Erdbeschleunigung [ $m \cdot s^{-2}$ ],  $\gamma$  = kubischer thermischer Ausdehnungskoeffizient [ $K^{-1}$ ],  $\Delta T$  = Temperaturänderung des Mediums [ $K$ ],  $\nu$  = kinematische Viskosität des Mediums [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

und für die Prandtl-Zahl:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.4)$$

wobei  $\eta$  = dynamische Viskosität des Mediums [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ] und  $c_p$  = spezifische Wärmekapazität [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ].

### Genutzter Rechenweg

Da die Konstanten  $C$ ,  $m$  und  $n$  nicht zu ermitteln waren, wurde als Rechenvorlage ein verwandtes Beispiel aus dem VDI Wärmeatlas (Verein Deutscher Ingenieure, 2006) genutzt, in dem der Wärmeübergangskoeffizient für eine vertikal angeströmte

## Kapitel 2. Material und Methoden

---

Platte bei natürlicher Konvektion berechnet wird. Die oben genannten Konstanten  $C$ ,  $m$  und  $n$  sind in der Formel für die Nusselt-Zahl bereits enthalten und sollten sich aufgrund des ähnlichen Szenarios, das berechnet wurde, auch übertragen lassen. Da die Werte nicht mit den exakten Konstanten für das berechnete Modell ermittelt werden konnten, weichen die berechneten Werte für  $\alpha_{htc}$  allerdings mit hoher Wahrscheinlichkeit von den realen Werten ab. Die Verhältnisse zwischen den errechneten Werten für verschiedene Fluide bleiben davon aber unberührt und können zum Vergleich genutzt werden.

$$Nu = \{0.825 + 0.387[Gr \cdot Pr \cdot f_1(Pr)]^{1/6}\}^2 \quad (2.5)$$

wobei  $f_1(Pr)$  eine Korrekturfunktion für die Prandtl-Zahl ist.

$$f_1(Pr) = [1 + (\frac{0.492}{Pr})^{9/16}]^{-16/9} \quad (2.6)$$

Die Grashof-Zahl und die Prandtl-Zahl wurden wie oben beschrieben berechnet und in Formel 2.1 für  $\alpha_{htc}$  eingesetzt, um den Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen.

### 2.3. Materialauswahl und -eigenschaften

**Tabelle 2.4.:** Materialwerte für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{htc}$ ; (1) (Lide, 2003), (2) (Dixon, 2007), (3) (Wacker-Chemie GmbH, 2014); \*<sub>1</sub> bei 1.7 °C, für 20 °C wahrscheinlich größer

$g$ [ $m/s^2$ ]	9.81			
$L$ [ $m$ ]	0.015			
$\Delta T$ [ $K$ ]	0.02			
	<b>Wasser</b>	<b>Luft</b>	<b>Silikonöl B10</b>	<b>GWG-50%</b>
$\gamma$ [ $1/K$ ]	2.00E-04 (1)	1/293 (2)	1.00E-03 (3)	0.485 (14)
$\nu$ [ $m^2/s$ ]	1.00E-06 (1)	1.63E-05 (1)	1.00E-05 (3)	$\eta/Dichte$ [ $kg/m^3$ ]
$c_p$ [ $J/kg \cdot K$ ]	4180 (1)	1007 (1)	1550 (3)	3.35 * <sub>1</sub> (14)
$\eta$ [ $Pa \cdot s$ ]	1.00E-03 (1)	1.87E-05 (1)	9.30E-03 (3)	6E-3 (14)
$\kappa$ [ $W/K \cdot m$ ]	0.607 (1)	0.0268 (1)	0.15 (3)	420 (14)

**Tabelle 2.5.:** Begründung für die Verwendung der genutzten Materialien

Material	Grund für die Verwendung
Luft	Luft wird als Sensorfluid in Golayzellen genutzt und wurde daher in die vergleichenden Untersuchungen aufgenommen. Luft hatte den höchsten thermischen Ausdehnungskoeffizienten aller genutzten Füllungen.
Wasser	Wasser wurde als einfachstes Sensorfluid mit in die Untersuchungen aufgenommen. Es war eine gute Grundlage für weitere vergleichende Messungen mit wässrigen Gemischen und kommt wahrscheinlich auch zu einem unbestimmten Prozentsatz im biologischen Modell vor.
Novec7100	Novec7100 ist ein Fluid, das sich durch einen für Flüssigkeiten besonders hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auszeichnete.
Silikonöl B10	Silikonöl hatte einen sehr ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie Ethanol, war jedoch mit erheblich mehr Materialien und den genutzten Klebern kompatibel.
GWG-50%	Das 50%ige Glycerol-Wasser-Gemisch wurde, neben Wasser, als zweites mögliches biologisches Modellfluid genutzt. Glycerol ist in allen natürlichen Fetten und Ölen vorhanden.
PVC-U	Hart-PVC wurde als Absorber gewählt, da es einfach zu bearbeiten ist.
PE HD	Polyethylen hat einen sehr hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.
CFRP	Carbon-Fiber-Reinforced-Plastic (CFRP), also kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, wurde aufgrund der besonders hohen Wärmeleitfähigkeit der in Längsrichtung ausgerichteten Kohlenstofffasern gewählt. Als Matrix dient hier ein Epoxy-Vinyl.
PEEK-HPV	PEEK-HPV wurde ebenfalls aufgrund der Kohlenstofffasern ausgewählt, hier dient allerdings PEEK als Matrix. Dieses ist stabiler als die Epoxy-Vinyl Matrix des CFRPs und durch die ungerichtet angeordneten Fasern ergeben sich homogenere Materialeigenschaften wie beispielsweise ein insgesamt sehr niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient.
Kupfer	Kupfer wurde als einziges Metall mit in die Messungen aufgenommen. Es hat eine sehr gute Wärmeleitung, bei einer hohen Dichte und einem kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten.
FullCure720	FullCure720, auch RGD720 genannt, ist ein UV-härtender Acrylbasierter Kunststoff, der als Grundmaterial für den 3-D-Druck von Absorbern in einem Eden 260V 3D-Drucker von Objet (heute Stratasys) genutzt wurde.
Herasil	Herasil ist ein IR-transmissives Fenster aus Quarzglas. Es diente, wie auch die Luft, zum Vergleich des Sensors mit einer Golayzelle, in der ebenfalls ähnliche Fenster genutzt werden.

**Tabelle 2.6.:** Tabelle der thermomechanischen Eigenschaften der in den Versuchen genutzten Flüssigkeiten und Materialien.

$c_p$  spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck bei 298.15K in  $J/kg \cdot K$ ;

$\alpha \cdot 10^{-3}/^{\circ}C^{-1}$  Raumausdehnungskoeffizient bei 293.15K; bei  $*_1$   $\alpha/^{\circ}C^{-1}$

$\gamma \cdot 10^{-3}/^{\circ}C^{-1}$  Längenausdehnungskoeffizient bei 293.15K;

$\kappa$  Wärmeleitfähigkeit bei 298.15K in  $mW/K \cdot m$ ;

$\rho$  Dichte in  $[g/cm^3]$  bei 293.15K;

$*_2$  bei 1.7  $^{\circ}C$ , für 20  $^{\circ}C$  wahrscheinlich größer;  $*_3$  für 100% Glycerol.

Quellen: (1) (Lide, 2003); (2) Anhang B.1; (3) (Silverstein and Bassler, 1963); (4) (Budzier et al., 2007); (5) (Rominger, 2003); (6) (Quadrant Plastic Composites GmbH, 2014); (7) (Jurima Dichtungen GmbH, 2014); (8) Anhang B.2; (9) Anhang B.3; (10) (Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG, 2014); (12) (3M Deutschland GmbH, 2014); (13) (Mellouki et al., 2007); (14) (The Dow Chemical Company, 2014); (15) (Cristancho et al., 2011); (16) (NIST, National Institute of Standards and Technology, 2014); (18) (Wacker-Chemie GmbH, 2014); (20) (Verein Deutscher Ingenieure, 2006); (21) (Baum, 2014); (22) (Auer Kunststofftechnik GmbH & Co, KG, 2014); (23) (Rominger, 2003); (24) (Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2014); (27) (Suter Kunststoffe AG, 2014); (28) COMSOL v.4.2 Material Browser (29) (Martienssen and Warlimont, 2005); (30) (Ashby, 2013); (31) (Pfundstein et al., 2008); (32) (Carvill, 1994); (33) (Dixon, 2007); (34) (Röchling Sustaplast KG, 2014); (35) (Schott AG, 2014); (36) (Baldrige et al., 2009), (37) (Chalmers et al., 2012)

Stoff	Dichte	$c_p$	$\alpha/\gamma$	$\kappa$	Absorption
100%Ethanol	0.7893(21)	2400 (1)	1.40 (1)	169 (1)	(3)
Luft	0.0012(20)	1001 (20)	$1/T_{in[K]}*_1$ (33)	25.87 (20)	(4)
Wasser	0.9998 (20)	4180 (1)	0.21 (1)	607.1 (1)	(3)
Novec7100	1.52 (25 $^{\circ}C$ )(12)	1170 (12)	1.8 (12)	68.8 (12)	NA
Silikonöl B10	0.93 (18)	1550 (18)	1.0 (18)	130 (18)	(37)
GWG-50%	1.1263 (15)	3.35 $*_2$ (14)	0.485 (14)	420 (14)	$*_3$ (16)
PVC-U	1.45 (34)	1050 (7)	0.08 (34)	200 (34)	(5)
PE-HD	0.93 (22)	1900 (22)	0.2 (22)	400 (22)	(5)
CFRP Fasern Tenax HT 5631	1.7 (27)	710 (27)	-0.001 (27)	$17 \cdot 10^3$ (27)	NA
PEEK-HPV	1.45 (6)	NA	0.0035 (6)	780 (6)	NA
Kupfer-ETP	8.93 (24)	386( 24)	0.0168 (24)	$394 \cdot 10^3$ (24)	NA
FullCure720	1.18 (2)	NA	0.193 (8)	205.6 (9)	NA
Herasil	2.2 (10)	772 (10)	0.0005 (10)	1380 (10)	(10)
Grafit	1.95 (28)	710 (28)	$1.9E^{-3}$ (29)	$153 \cdot 10^3$ (28)	(13), (36)
Baumwolle	0.08 (1)	840-1300 (31)	0.015-0.03 (30)	29 (32)	NA
Borofloat33	2.2 (35)	830 (35)	$3.25E^{-3}$ (35)	1200 (35)	(35)

# Kapitel 3.

## Ergebnisse

### 3.1. Evaluation der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eines Sensors ohne Ventil

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse wurden mit einem Sensor mit einer Sensorbasis ohne integriertem Ventil aufgenommen und sollen auf ihre Reproduzierbarkeit untersucht werden. Abweichend von der in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Methode wurden 150 Expositionen anstatt der dort genannten 100 aufgenommen. Der Aufbau der Sensorbasis ist in Abschnitt 2.2.1.1 ausführlich beschrieben. Als Absorber wurde ein 1 *mm* dicker PVC-Absorber genutzt, als Sensorfluid diente destilliertes Wasser.

#### 3.1.1. Ergebnisse

In Tabelle 3.1 sind die Messergebnisse von sechs neuen Befüllungen des Sensors mit Wasser aufgelistet.

Während die Varianzen der Antwortamplituden innerhalb der einzelnen Befüllungen recht klein sind, zeigen sich zwischen den Befüllungen deutlich größere Unterschiede. So zeigen die gemittelten Antwortamplituden aller Befüllungen eine Varianz von 31.66 *mV*, was einer Varianz von 27.5% entspricht. Die Antwortamplituden innerhalb der einzelnen Befüllungen zeigen hingegen nur eine kleine Varianz von maximal 1.67 *mV* was circa 3.2% entspricht. Sowohl die Varianzen als auch die Antwortamplituden der einzelnen Befüllungen wurden mit zunehmender Befüllungszahl kleiner, nur Befüllung 4 zeigte nochmal ein deutlich größeres Signal. Auch die prozentuale Varianz wurde mit zunehmender Befüllungszahl kleiner, nur bei Befüllung 5 war die Varianz prozentual etwas größer als bei der vorangegangenen Befüllung.

**Tabelle 3.1.:** Messergebnisse des Sensors mit Sensorbasis ohne Ventil. Alle Messungen bei einer Chopperfrequenz von  $1\text{ Hz}$ , einem  $1\text{ mm}$  dicken PVC-Absorber und Wasser als Sensorfluid. Anzahl der gemessenen Antwortamplituden je Befüllung = 150,  $N = 6$

Befüllung #	1	2	3	4	5	6
$\bar{x}$ <b>Amp</b> [mV]	52.80	44.61	41.64	46.72	38.10	38.23
$\bar{x}$ <b>Var</b> [mV]	1.67	1.03	0.57	0.48	0.43	0.17
Varianz zwischen den Befüllungen: $31.66\text{ mV}$						

### 3.1.2. Bewertung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse eines Sensors ohne Ventil

Die Messungen zeigen deutlich, dass die Varianz zwischen den einzelnen Befüllungen mit  $31.66\text{ mV}$  bzw.  $27.5\%$  bei dieser Sensorkonfiguration sehr groß ist. Dies liegt vermutlich daran, dass - wie eine optische Kontrolle zeigte - die Membran nach dem Befüllen bereits erheblich ausgelenkt war. Diese Vorauslenkung entsteht durch das Verschrauben des Absorbers auf der Sensorbasis. Dabei wird offenbar ein Punkt überschritten, bei dem aus dem Sensor zwar kein Wasser mehr entweichen kann, der Absorber jedoch noch nicht fest verschraubt ist. Wird der Absorber nun fest verschraubt, führt dies bereits zu einer deutlichen Druckzunahme im Sensor, die die Membran auslenkt. Bei einem erneuten Verschrauben kommt es offenbar zu kleinen Abweichungen in der Anzugsfestigkeit des Absorbers, was in einer unterschiedlichen Vorspannung der Membran resultiert.

Da die Membran einer fortschreitenden Auslenkung einen kontinuierlich größer werdenden Widerstand entgegenbringt, kommt es bei unterschiedlich starker Vorauslenkung zu unterschiedlich großen Antwortamplituden des Sensors, die sich in der Empfindlichkeit des Sensors widerspiegeln.

Die starke Vorauslenkung der Membran hat auch einen starken Einfluss auf deren Klebung. So hat der Versuch gezeigt, dass sich der verwendete Spezialkleber durch den großen Druck auf die Membran schnell wieder löst. Hierdurch bilden sich zunächst kleine Hohlräume, die sich bei einem Wechsel des Fluids mit Luft füllen können. Im weiteren Verlauf wird die Klebung undicht und das Sensorfluid kann aus der Kammer austreten, wodurch der Sensor nicht mehr funktionsfähig ist.

Die große Vorauslenkung der Membran und die damit verbundene hohe Varianz der Messwerte sowie die schnelle Lösung des Klebers haben gezeigt, dass es zwingend notwendig ist, den durch das Verschrauben des Sensors entstehenden Druck zu eliminieren. Hierfür wird für die folgenden Versuche ein Ventil in die Sensorbasis integriert, das während des Befüllvorganges geöffnet wird und einen Druckabbau



beim Verschrauben des Absorbers gewährleistet (siehe Abschnitt 3.1). Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass nach jeder neuen Befüllung der gleiche Druck in der Druckkammer herrscht und die Membran nicht bereits vor Beginn des Versuches ausgelenkt ist.

## 3.2. Evaluation von verschiedenen Ausleseeinheiten

Nachdem mit der in Abschnitt 2.2.1.1 beschriebenen Sensorbasis ohne Ventil keine reproduzierbaren Sensorantworten messbar waren, wurde eine neue Sensorbasis mit Ventil entwickelt. Eine Beschreibung dieser Sensorbasis ist in Abschnitt 2.2.1.2 zu finden. Vorversuche hatten bereits gezeigt, dass die in Abschnitt 3.1 beschriebene Vorauslenkung der Membran hier nicht mehr auftritt und die Messergebnisse dadurch reproduzierbarer wurden.

Im Folgenden soll die Eignung von verschiedenen Ausleseeinheiten für einen photomechanischen IR-Sensor evaluiert werden. Hierfür wurde die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse mit drei verschiedenen Ausleseeinheiten untersucht.

Es wurden ein kapazitiver Wegaufnehmer und ein Elektret-Mikrofon mit der in Abschnitt 2.2.1.2.1 vorgestellten Sensorbasis mit Ventil und ein Plattenkondensator aus dem FZ caesar in einem Prototyp des FZ caesar (siehe Abschnitt 2.1) untersucht. Der Kondensator aus dem FZ caesar war fest in den Prototypen integriert. Mehrere Versuche diese Kondensatoren in eine Sensorbasis mit Ventil zu überführen sind nicht gelungen (siehe Abbildung 4.1 in Abschnitt 4).

### 3.2.1. Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Prototyp aus dem FZ caesar

Für die Messung der Reproduzierbarkeit des Sensorprototyps aus dem FZ caesar standen zwei verschiedene Sensorprototypen zu Verfügung. In der ersten Konfiguration war der Sensor mit einem IR-transmissiven Fenster aus Silizium ausgestattet und mit Luft gefüllt; er entsprach also einer Golayzelle ohne zusätzlichen Absorber (siehe Abschnitt 1.2.2.1.1).

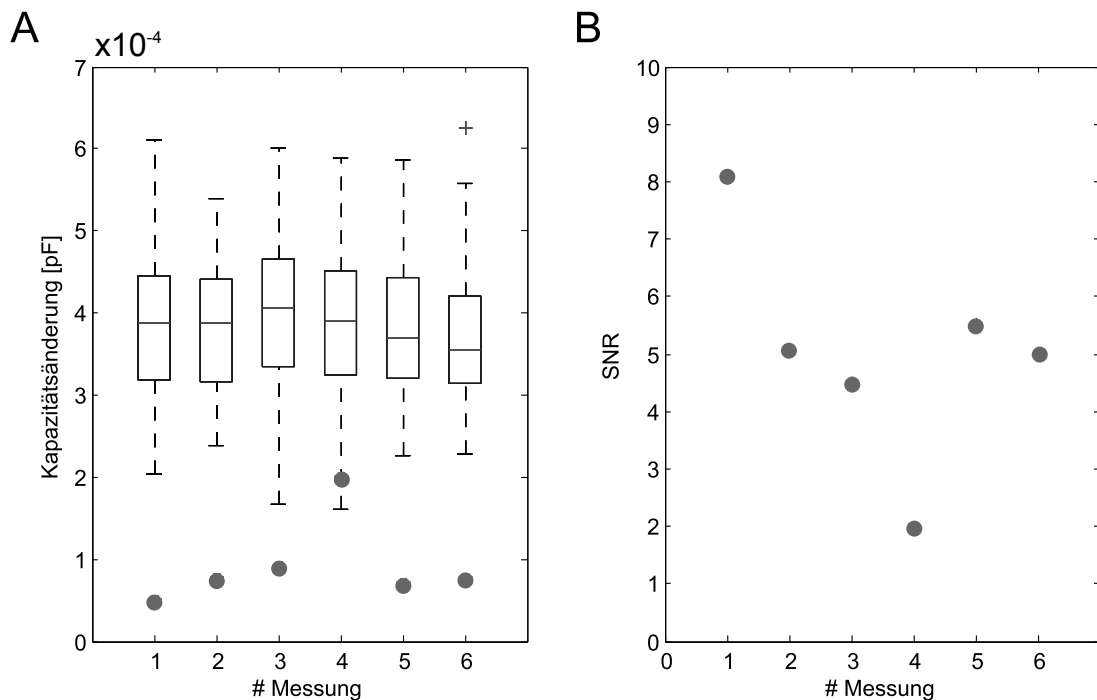
In der zweiten Konfiguration wurde ein wassergefüllter Sensor mit einem IR-transmissiven Fenster aus Borosilikatglas genutzt. Eine genaue Beschreibung des Sensoraufbaus und der Durchführung der Messungen ist in Abschnitt 2.1 zu finden.

### 3.2.1.1. Messungen mit Luft als Sensorfüllung

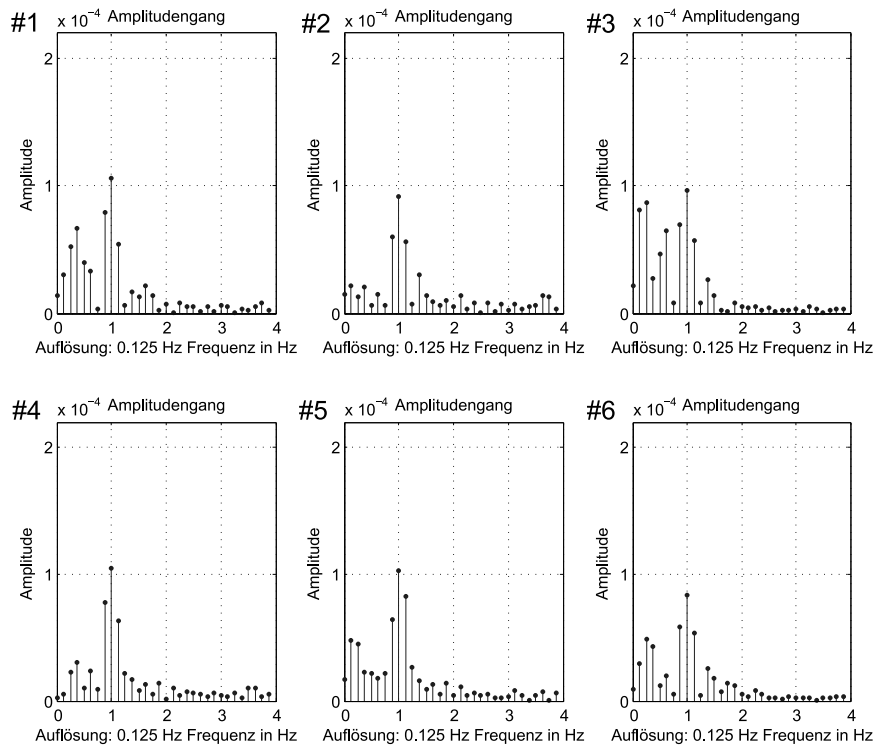
Die folgenden Messungen wurden mit dem mit Luft gefüllten Sensorprototyp durchgeführt.

#### 3.2.1.1.1. Ergebnisse

Die Unterschiede zwischen den medianen Antwortamplituden in Abbildung 3.1A sind mit einer Differenz von bis zu 15% recht hoch, die Reproduzierbarkeit ist also nicht gut. Im Vergleich zum Rauschen sind die Sensorantworten zudem sehr klein. Dies zeigt sich auch in den sehr kleinen Signal-to-Noise-Ratios (SNR) in Abbildung 3.1B. Wie in Abbildung 3.1A zu sehen, ist das für Messung #4 ermittelte SNR deutlich kleiner als bei den anderen fünf Messungen.



**Abbildung 3.1.:** A) Antworten des FZ-caesar-Sensors mit Luftfüllung auf IR-Expositionen mit einer Intensität von  $260 \text{ W/m}^2$ . Der Boxplot zeigt die Verteilung der ermittelten Antwortamplituden; die Kreise zeigen den Root-Mean-Square des Rauschens der jeweiligen Messreihe; B) Signal-to-Noise-Ratio der sechs Messreihen.  $N = 6$



**Abbildung 3.2.:** FFT-Analysen der Messungen des luftgefüllten Sensors aus dem FZ caesar; Nummeriert von #1 bis #6. Bin Breite entspricht 0.125 Hz.

Die durchgeführten Fast-Fourier-Transformationen (FFT) zeigen für alle sechs Messreihen eine dominante Frequenz von 1 Hz, was der Expositionsfrequenz entspricht (siehe Abbildung 3.2). Es sind aber auch andere - vor allem niederfrequente - Frequenzen noch deutlich zu erkennen.

Für spätere Vergleiche wird die Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  des Sensors berechnet (vgl. Formel 1.6 in Kapitel 1.1.1). Für die Berechnung wurde die mittlere Antwortamplitude aus allen sechs Durchgängen ( $2.42 \cdot 10^{-4} \text{ pF}$ ), sowie die Intensität der Strahlung, die auf der Sensorfläche auftraf (Sensorfläche= $1.71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ); Strahlungsintensität= $4.45 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ ) genutzt.

Hieraus ergibt sich eine Empfindlichkeit von  $\mathfrak{R} = 0.0544 \text{ pF/W}$ . Zusammen mit der gemittelten gemessenen Rauschspannung ( $U_r = 0.70 \cdot 10^{-4} \text{ pF}$ ) berechnet sich daraus eine Noise-Equivalent-Power von  $0.0013 \text{ pF}$  beziehungsweise eine  $NEP''$  von  $75.59 \text{ pF/m}^2$ .

### 3.2.1.1.2. Bewertung der Ergebnisse

Durch die etwa 50%ige Transmissivität des Silizium im Bereich von etwa  $3 - 5 \mu\text{m}$  erreicht die Strahlung nicht vollständig die luftgefüllte Druckkammer des Sensors, sondern wird teilweise bereits durch das gut wärmeleitende Silizium ( $\kappa=1.48 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$  Lide, 2003) absorbiert, das die Wärme vermutlich schnell an das Sensorgehäuse ableitet. Ein zusätzlicher Absorber würde dafür sorgen, dass die in die Druckkammer einfallende Strahlung optimal absorbiert und die Wärme an die umgebende Luft in der Kammer abgeben wird. Dies würde wahrscheinlich zu einer verbesserten Empfindlichkeit und höheren Signal-to-Noise-Ratio führen. Luft selbst ist aufgrund der sehr geringen Dichte ein sehr schlechter Absorber. So wäre es ohne einen zusätzlichen Absorber möglich, dass ein Teil der Strahlung, der nicht durch die Luftmoleküle absorbiert wurde, durch die Membran auf der Rückseite des Sensors wieder aus der Kammer austritt. Auch wäre es möglich, dass ein Teil der Strahlung durch das Fenster wieder aus der Druckkammer heraus reflektiert wird und somit für die Signalerzeugung verloren geht.

### 3.2.1.2. Sensorkonfiguration mit abgedecktem Fenster

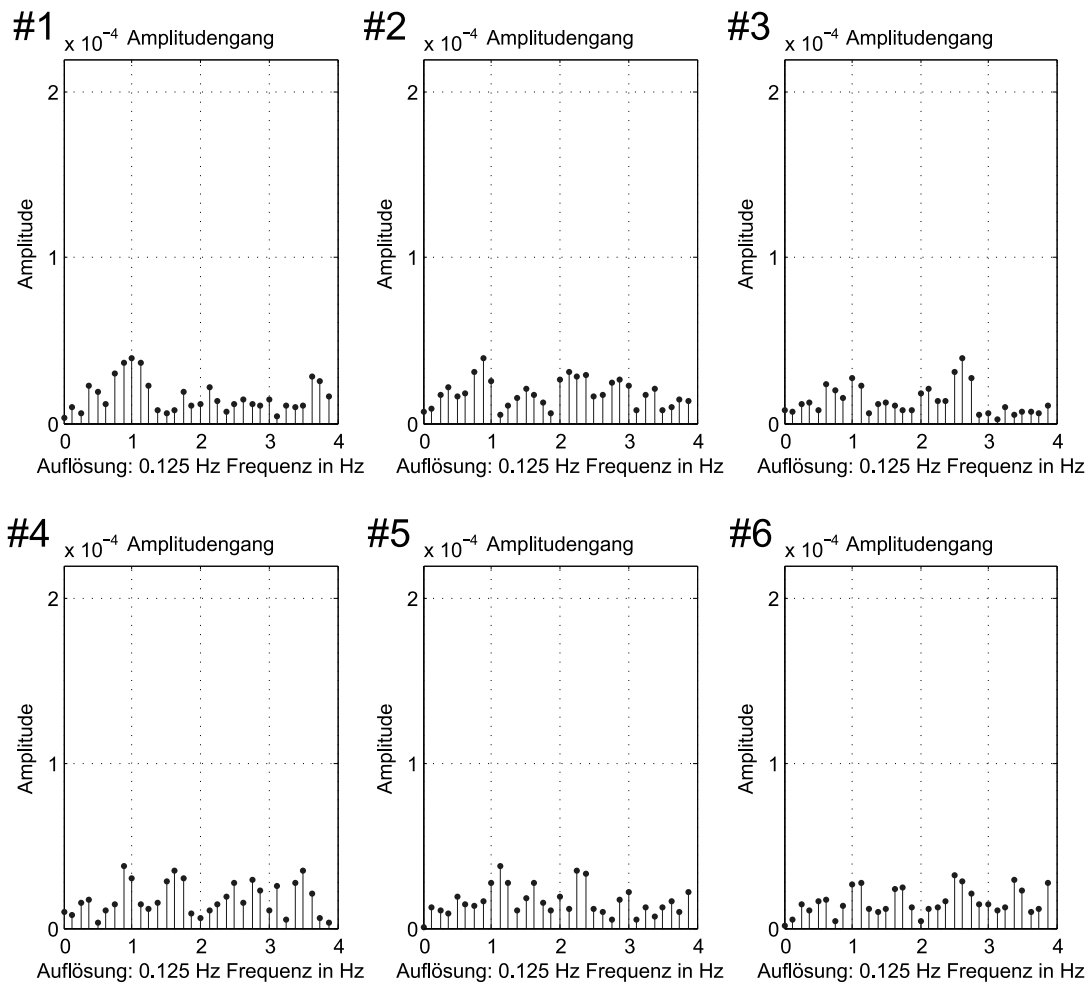
Zur Überprüfung, ob die in Abschnitt 3.2.1.1 ermittelten Sensorantworten tatsächlich von einer Erwärmung der Luft in der Druckkammer und nicht etwa von einer Erwärmung des gesamten Chips herrühren, wurde der folgende Versuch durchgeführt. Das IR-transmissive Fenster wurde mit einem dünnen Stück Papier abgeschattet, so dass die Kammer nicht mehr der Strahlung exponiert war. Der Versuchsaufbau unterscheidet sich ansonsten nicht von dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Aufbau.

#### 3.2.1.2.1. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Abschattung des IR-transmissiven Fensters sind in Form von Fast-Fourier-Transformation Analysen in Abbildung 3.3 dargestellt. Es zeigt sich für alle sechs Messreihen ein über alle Frequenzen feststellbares Rauschen mit leichten Andeutungen eines dominanten Signals bei  $1 \text{ Hz}$  (siehe z.B. #1 und #2) und häufig auch bei höheren Frequenzen zwischen  $2 \text{ Hz}$  und  $3 \text{ Hz}$  (siehe z.B. #3, #5 und #6).

#### 3.2.1.2.2. Bewertung der Ergebnisse

Eine Bestrahlung des Chips ohne eine Bestrahlung der Sensorkammer führt zu keinem eindeutig identifizierbaren Signal bei  $1 \text{ Hz}$ . Im Umkehrschluss



**Abbildung 3.3.:** FFT-Analysen der Messungen des luftgefüllten FZ-caesar-Sensors mit abgedecktem Fenster;  $N = 6$ , nummeriert von #1 bis #6. Bin Breite =  $0.125 \text{ Hz}$ .

bedeutet dies, dass die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2.1.1 tatsächlich auf Effekte in der Sensorkammer zurückzuführen sind. Ob das Signal dort aus einer Ausdehnung der Luft in der Kammer oder einer Erwärmung der Membran und einer dadurch hervorgerufenen möglichen Membranauslenkung resultiert, lässt sich nicht eindeutig klären. Da der Sensor aufgrund der nicht modularen Bauweise nicht in einzelne Komponenten zerlegt werden kann, können die einzelnen Komponenten nicht separat getestet werden.

### 3.2.1.3. Messungen mit Wasser als Sensorfüllung

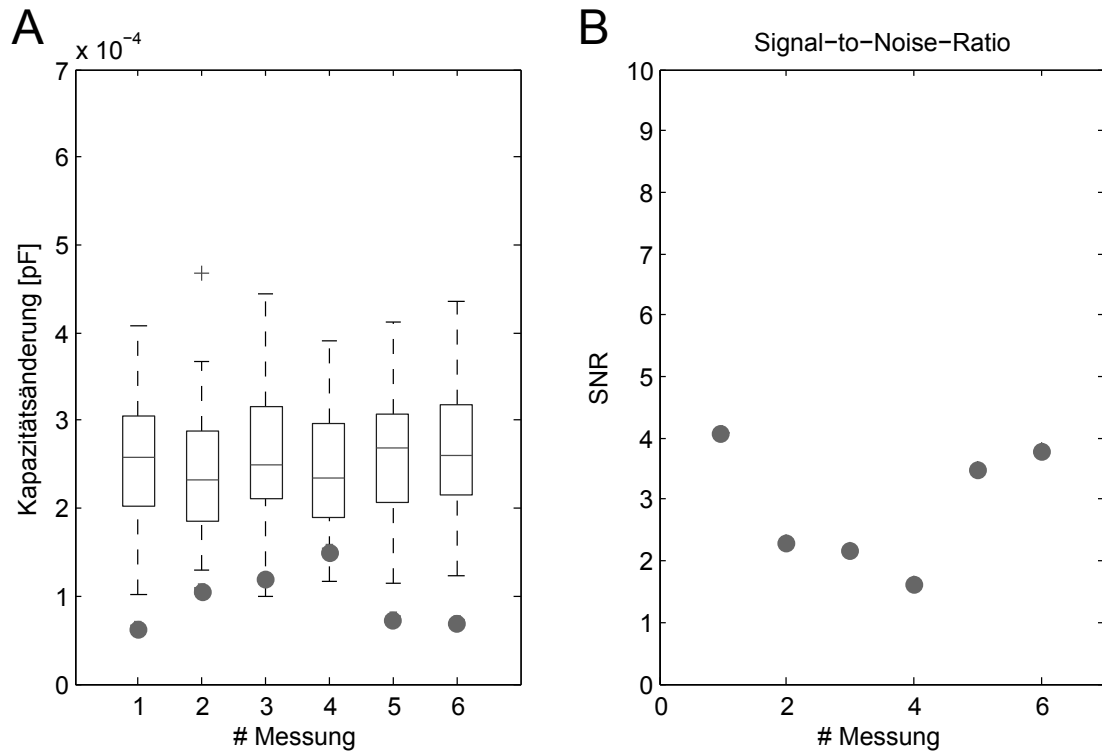
Auch bei den Messungen mit wassergefüllter Druckkammer entspricht der Versuchsaufbau dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Aufbau. Alle vom FZ caesar zu Verfügung gestellten wassergefüllten Sensoren hatten eine oder mehrere deutlich sichtbare Luftblasen (Durchmesser  $0.5 - 1 \text{ mm}$ ) in der Druckkammer. Der Membrandurchmesser betrug, wie auch in Abschnitt 3.2.1.1,  $3.3 \text{ mm}$ . Die Ergebnisse sind daher diesbezüglich direkt vergleichbar. Im Unterschied zu dem Sensor mit Luftfüllung war in der Sensorkonfiguration mit einer Wasserfüllung ein IR-transmissives Fenster aus Borosilikatglas verbaut. Um die Kapazität des Sensors an den Messbereich des CDCs anzupassen, musste ein Adapter mit  $30 \text{ pF}$  genutzt werden der die Kapazität herabsetzte. Hierunter litt allerdings die Sensitivität des Sensors (siehe Datenblatt des CDC).

#### 3.2.1.3.1. Ergebnisse

Wie in Abbildung 3.4A zu erkennen ist, sind die gemessenen Peak-to-Peak-Amplituden kleiner als bei dem luftgefüllten Sensor (siehe Abbildung 3.1A), während sich das Rauschen auf einem ähnlichen Niveau befindet. Dementsprechend ist das Signal-to-Noise-Ratio beim wassergefüllten Sensor im Schnitt deutlich schlechter (siehe Abbildung 3.1B). Die auffälligen Ähnlichkeiten zwischen der Rauschverteilung über die sechs verglichenen Messungen des mit Luft und Wasser gefüllten Sensors sind rein zufällig.

Werden die Messergebnisse nicht nur anhand der Antwortamplituden, sondern auch anhand der Frequenzverteilungen (siehe Abbildung 3.5) betrachtet, ist deutlich erkennbar, dass die Expositionsfrequenz von  $1 \text{ Hz}$  nicht als dominante Frequenz erkennbar ist. Tatsächlich ist die Verteilung der Frequenzen mehr mit der aus Abbildung 3.3 vergleichbar, bei der das Fenster abgedeckt wurde und bei der ebenfalls kein dominantes Sensorsignal bei der Expositionsfrequenz erkennbar ist.

Auch nachfolgende Versuche mit einer erhöhten IR-Intensität hatten keine eindeutig erkennbaren Antwortamplituden bei der Expositionsfrequenz von  $1 \text{ Hz}$  zur Folge

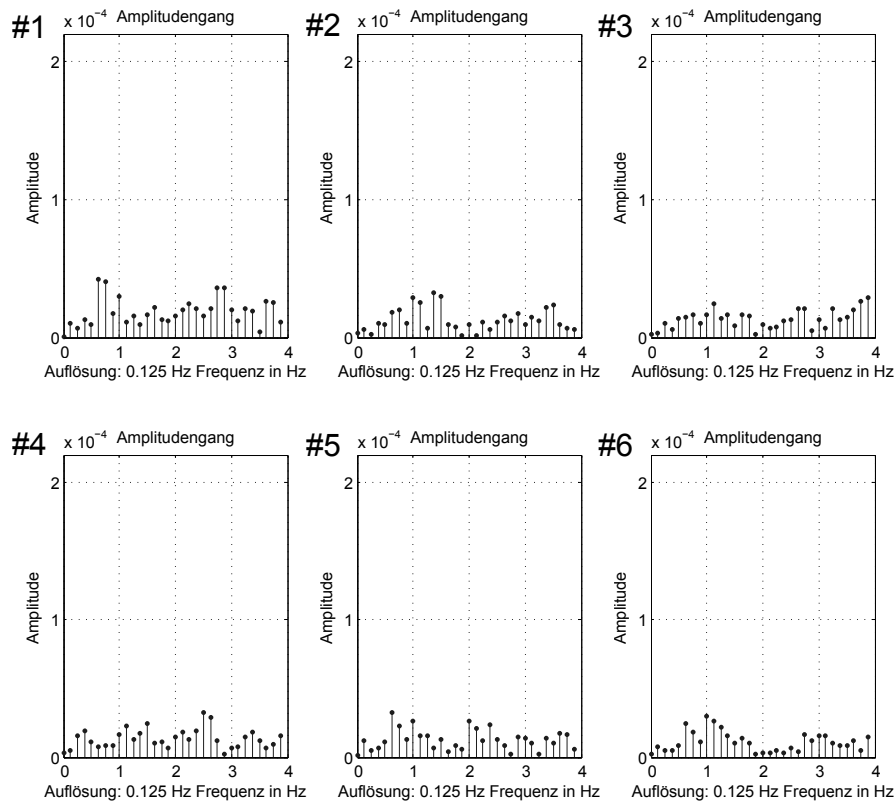


**Abbildung 3.4.:** A) Antworten des FZ-caesar-Sensors mit Wasserfüllung auf IR-Expositionen mit einer Intensität von  $260 \text{ W/m}^2$ ; der Boxplot zeigt die Verteilung der ermittelten Amplituden, die Kreise zeigen den Root-Mean-Square des Rauschens der jeweiligen Messreihe; B) Signal-to-Noise-Ratio der sechs Messreihen.

(Versuche nicht gezeigt). Eine Schwelle, bei der der Sensor mit Wasserfüllung eindeutig auf eine Modulation der IR-Strahlung reagiert, konnte mit dem genutzten Setup nicht bestimmt werden.

### 3.2.1.3.2. Bewertung der Ergebnisse

Wie im Transmissionsspektrum des Borosilikatglases (siehe Schott AG, 2014) zu erkennen ist, sinkt die Transmission der IR-Strahlung schon bei  $2.8 \mu\text{m}$  rapide von 90% auf etwa 33% ab. Bei etwa  $3.2 \mu\text{m}$  existiert eine schmale Bandbreite, in der etwa 75% der Strahlung durch das Fenster dringt. Ab  $3.5 \mu\text{m}$  liegt die Transmission jedoch bereits wieder bei einem Wert von nur etwa 15%. Ein Vergleich des Transmissionsspektrums des Fensters mit dem vom Schwarzkörperstrahler emittierten Spektrum (siehe Abbildung 1.1A) zeigt deutlich,



**Abbildung 3.5.:** FFT-Analysen für die Messwiederholungsreihen des FZ-caesar-Sensors mit Wasserfüllung;  $N = 6$  Nummeriert von #1 bis #6. Bin Breite =  $0.125 \text{ Hz}$ .

dass ein großer Teil der vom Strahler emittierten Strahlung bereits vom Fenster absorbiert wird und nicht, wie eigentlich beabsichtigt, in der Druckkammer des Sensors durch das Fluid.

Den größten Beitrag zu der geringen Empfindlichkeit des Sensors tragen aber wahrscheinlich die Luftblasen im Fluid in der Druckkammer bei, die bereits vor dem Start der Versuche existierten und eine massive Verschlechterung der Sensorantwort zur Folge haben (siehe Abschnitt 3.2.3.5).

### 3.2.1.4. Bewertung der Reproduzierbarkeit des Prototypen aus dem FZ caesar

Die Messungen mit den im FZ caesar entwickelten Sensorprototypen zeigen, dass es noch einiger Verbesserungen bedarf, bevor diese Sensoren ansatzweise funktionieren.



So gibt es Limitierungen durch den genutzten Kapazität/Digital-Wandler (CDC), für den es auf dem Markt aber noch keinen sinnvollen Ersatz gibt. Der genutzte CDC funktioniert nur in einem sehr eingeschränkten Kapazitätsbereich. Die Abtastfrequenz ist mit maximal  $100\text{ Hz}$  sehr gering, wobei diese durch die Frequenz des Abrufens der Daten durch den Computer nochmals herabgesetzt wird. Zudem sinkt das SNR bei Nutzung der höheren Abtastraten (siehe Datenblatt des CDC), so dass hier nur niedrigere Abtastraten genutzt wurden.

Unvorteilhaft für das Testen der Sensorprototypen im Labor ist zudem, dass die Sensoren nicht modular aufgebaut sind. Hat ein mit Fluid gefüllter Sensor, wie bei den hier genutzten Sensoren geschehen, Luft gezogen, ist er nicht mehr zu nutzen und muss komplett ausgetauscht werden. Dies ist ein großes Problem bei einer Herstellungsdauer von mehreren Wochen bis hin zu Monaten und einer daraus resultierenden limitierten Anzahl von verfügbaren Sensoren.

Problematisch ist bei den beiden getesteten Sensorvariationen auch, dass in beiden Konfigurationen verschiedene IR-transmittierende Fenster genutzt wurden. Hierdurch kommt es zu einer weiteren Quelle für Verzerrungen der Messergebnisse, die eine Ursachenanalyse für die schlechten Messergebnisse erschwert.

Die berechnete  $NEP''$  von  $75.59\text{ W/m}^2$  des Sensors ist im Vergleich zu denen von Schossig et al. (2013) angegebenen  $NEP''$ -Werten von  $0.036\text{ W/m}^2$  schlecht. Beide Sensorprototypen funktionieren jedoch nach dem gleichen Prinzip, auch wenn der von Schossig et al. (2013) verwendete Sensor etwas größer und bereits für die Absorption in IR-Strahlung als Golayzelle optimiert ist.

### 3.2.2. Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Elektret-Mikrofon als Ausleseinheit

In diesem Abschnitt soll die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eines Sensors mit einem Elektret-Mikrofon als Ausleseinheit untersucht werden. Hierfür wurde der Einfluss von Membranwechseln sowie die Eignung von verschiedenen Membranen ermittelt. Zu diesem Zweck wurden Membranen aus sechs verschiedenen Materialien jeweils 12 mal ausgetauscht und durch neue ersetzt. Dies war auch immer mit einer neuen Befüllung des Sensors mit Wasser verbunden. Es wurde ein Absorber aus  $1\text{ mm}$  dickem PVC gewählt.

#### 3.2.2.1. Ergebnisse

Werden die Sensorantworten für verschiedene Membranen über die getesteten Chopperfrequenzen verglichen, werden große Unterschiede zwischen den Sensorantworten

deutlich (siehe Abbildung 3.6). So unterscheiden sich nicht nur die Sensorantworten mit verschiedenen Membranmaterialien voneinander, auch zwischen neu eingesetzten Membranen gleichen Materials gibt es eine große Varianz der Antwortamplituden über die getesteten Frequenzen. Als besonders extremes Beispiel sei hier auf eine Messung in Abbildung 3.6D hingewiesen, bei der die Stärke der Sensorantwort bis  $5\text{ Hz}$  deutlich zunimmt und sogar bei einer Frequenz von  $15\text{ Hz}$  noch über der Stärke der Sensorantwort bei einer Messfrequenz von  $1\text{ Hz}$  liegt, bei der es sonst zu den größten Sensorantworten kommt. Aber auch bei allen anderen Membranmaterialien kommt es bei einzelnen Messungen zu stärkeren Sensorantworten bei höheren Frequenzen.

Exemplarisch wurden Signifikanzanalysen für  $1\text{ Hz}$  und für  $15\text{ Hz}$  durchgeführt, die ergeben, dass sich die Antwortamplituden aller Membranmaterialien signifikant voneinander unterscheiden (mit  $P$  mindestens kleiner als  $0.05$ ).

Die prozentuale Varianz, also die Varianz normiert auf die Größe der mittleren Antwortamplitude aller Messungen mit identischem Membranmaterial, liegt über alle Frequenzen für  $40\text{ }\mu\text{m}$  dickes Latex im Bereich zwischen  $84\%$  und  $88\%$ , für  $50\text{ }\mu\text{m}$  dickes Latex bei circa  $9\%$ , für PE zwischen  $130\%$  und  $240\%$ , für PU bei circa  $6.5\%$ , für  $50\text{ }\mu\text{m}$  dickes PVC bei circa  $20\%$  und für  $80\text{ }\mu\text{m}$  dickes PVC bei circa  $15\%$ . Grade bei PE kommt es aber aufgrund der sehr großen Varianzen der letzten drei Befüllungen zu einer starken Verzerrung der Gesamt-Varianz. Werden diese drei Befüllungen aus der Varianzanalyse eliminiert, ergibt sich eine prozentuale Varianz von etwa  $13\%$ . Der gleiche Effekt tritt auch bei einer Eliminierung der Messergebnisse der letzten drei Befüllungen mit der  $40\text{ }\mu\text{m}$  dicken Latexmembran auf. Hier ergibt einer korrigierte Varianzanalyse eine prozentuale Varianz von etwa  $5\%$ .

Da die prozentuale Varianz die gesamte Varianz der Werte aller Befüllungen zeigt und nicht die der gemittelten Amplituden wie in Abbildung 3.6 dargestellt, weichen die Werte für die jeweiligen Membranen stärker voneinander ab als es in der Abbildung den Anschein hat.

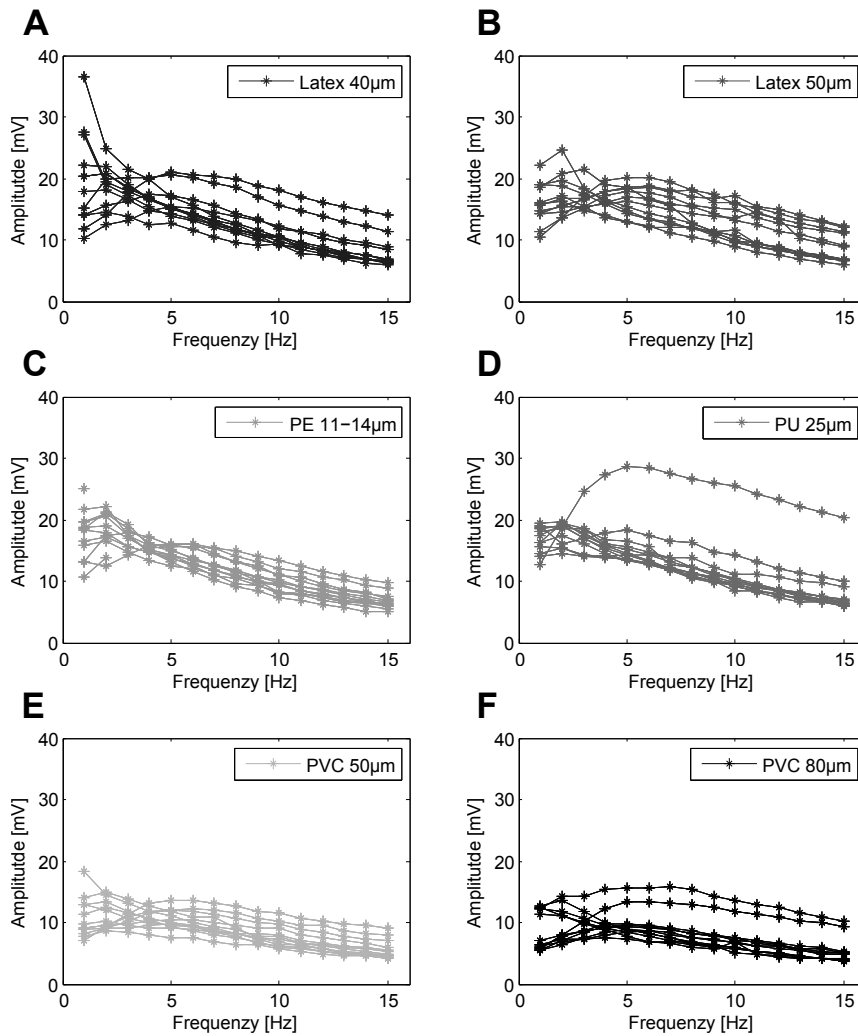
### 3.2.2.2. Bewertung der Reproduzierbarkeit des Sensors mit Elektret-Mikrofon-Ausleseeinheit

Erheblich voneinander abweichende Antwortamplituden und Kurvenverläufe lassen sich bei allen getesteten Membranmaterialien in unterschiedlich starker Ausprägung beobachten. Die Differenzen wurden wahrscheinlich durch die unterschiedlich starke Vorspannung der Membranen verursacht, die durch das Festpressen der Membran am Sensorgehäuse entstand. Auch durch Markierungen am Gehäuse ließ sich die Vorspannung durch das manuelle Verschrauben der Presskapsel jedoch offenbar nicht immer auf den gleichen Wert justieren.

Die Unterschiede in der Stärke der Sensorantworten bei den verschiedenen Frequenzen lassen sich zumindest teilweise mit den verschiedenen Materialeigenschaften der Membranen erklären. So ist das PVC bei gleicher Dicke erheblich härter als eine Membran aus Latex. Einen großen Einfluss wird aber vermutlich auch die starke Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit des Mikrofons selbst haben. Besonders durch den eingebauten FET und seinen an hohe Frequenzen angepassten DC-Remove kommt es bei niedrigeren Frequenzen zu geringeren Sensorantworten als dies ohne DC-Remove der Fall wäre.

Die hohen prozentualen Varianzen, die teilweise sogar deutlich über dem einstelligen Prozentbereich liegen, zeigen, dass die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse nicht sehr hoch ist. Besonders deutlich wird dies auch in den voneinander abweichenden Kurvenverläufen der einzelnen Messungen mit gleicher Membran.

Für die PU-Membran wurde exemplarisch für  $1\text{ Hz}$  die  $NEP''$  berechnet. Mit einer mittleren Empfindlichkeit von  $\mathfrak{R} = 0.3635\text{ V/W}$ , einer Rauschspannung von  $U_r = 7.86 \cdot 10^{-4}\text{ V}$  und einer Sensorgröße von  $1.7671 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$  beträgt die  $NEP'' = 12.24\text{ W/m}^2$ . Die  $NEP''$  des Sensors mit Elektret-Mikrofon als Ausleseeinheit ist somit circa sechsmal besser als die des Sensorprototypens aus dem FZ caesar.



**Abbildung 3.6.:** Abbildung der gemittelten Sensorantworten der Messungen mit sechs verschiedenen Membranen bei einer Chopperfrequenz von 1 – 15  $Hz$ , jede Kurve wurde mit jeweils einer neuen Befüllung und einer neuen Membran aufgenommen. A) Latex 40  $\mu m$ , B) Latex 50  $\mu m$ , C) PE 11 – 14  $\mu m$ , D) PU 25  $\mu m$ , E) PVC 50  $\mu m$ , F) PVC 80  $\mu m$ ;  $N = 10$

### 3.2.3. Reproduzierbarkeit der Messungen eines mit Wegaufnehmer versehenen Sensors

Die Reproduzierbarkeitsmessungen mit dem kapazitiven Wegaufnehmer (Modell 4810 mit einem 2803-Sensorkopf, Firma ADE Technologies (heute MicroSense), (USA)) teilen sich in fünf verschiedene Experimente auf:

- 1) Reproduzierbarkeit der Daten nach dem Wechsel der Membran.
- 2) Reproduzierbarkeit der Daten nach dem neuen Befüllen.
- 3) Reproduzierbarkeit der Daten ohne Änderungen am Sensor.
- 4) Messung des Einflusses einer IR-Abschirmung von der Sensorbasis und dem Ventil.
- 5) Einfluss von Luftblasen in der Sensordruckkammer auf Messergebnisse.

Der Versuchsaufbau und Details zur Durchführung des Versuchs sind in Abschnitt 2 ausführlich beschrieben; die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Werte ist in Abschnitt 2.2.2.2 beschrieben.

Die Messungen wurden für Chopperfrequenzen von  $1 - 15 \text{ Hz}$  durchgeführt; für alle Versuche wurde Wasser als Sensorfüllung und ein  $1 \text{ mm}$  dicker Absorber aus schwarzem PVC verwendet.

#### 3.2.3.1. Reproduzierbarkeit der Daten nach dem Wechsel der Membran

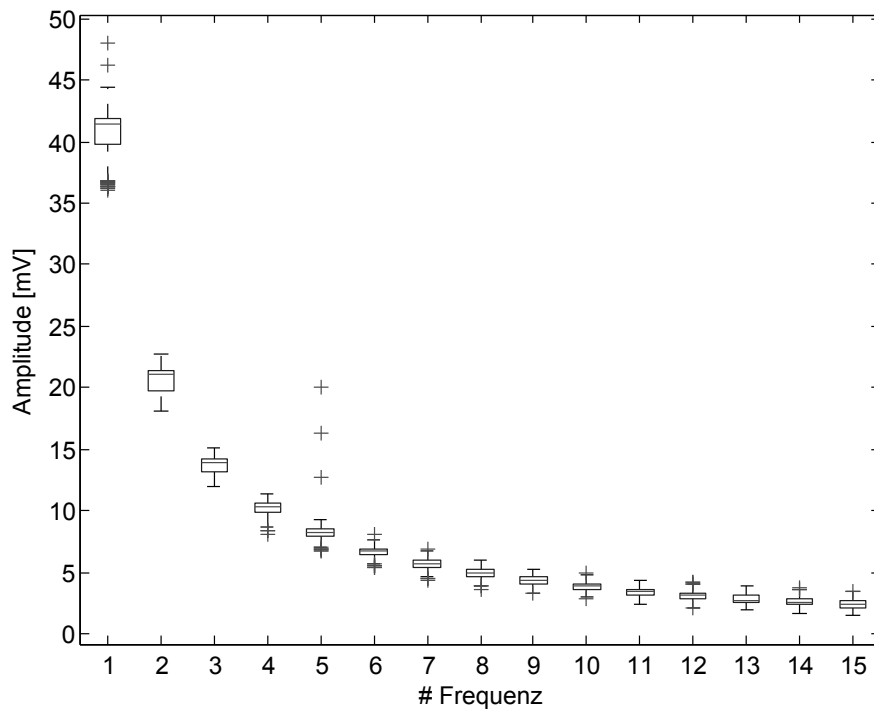
Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, besteht die Ausleseeinheit des Sensors unter anderem aus einer Membran, deren Auslenkung gemessen wird. Die Membran ist mithilfe eines Anpress-Schraubverschlusses am Gehäuse fixiert.

Um den Einfluss eines Membranwechsels zu untersuchen, wurde das Anpresssystem 10 mal gelöst und die Membran durch eine neue ersetzt. Durch Markierungen am Gehäuse wurde versucht, beim Verschrauben immer den gleichen Anpressdruck zu erreichen.

##### 3.2.3.1.1. Ergebnisse

Abbildung 3.7 zeigt einen Boxplot der Messergebnisse des Sensors für die Expositionsfrequenzen von  $1 - 15 \text{ Hz}$ . Die Antwortamplituden werden mit ansteigenden Frequenzen kleiner, wobei die Stärke der Abnahme der Antwortamplituden der Form nach einer exponentiellen Abnahme folgt.

Auch die Varianz nimmt mit ansteigender Frequenz ab. Die prozentuale Varianz,



**Abbildung 3.7.:** Boxplot der Messergebnisse des Sensors mit 10 neu eingesetzten Membranen für die Expositionsfrequenzen von 1 – 15  $Hz$  mit Wasser als Füllung und einem Absorber aus 1  $mm$  dickem PVC

also die Varianz normiert auf die Größe der mittleren Antwortamplitude der jeweiligen Frequenz, ist mit Werten zwischen 2.5% und 7.5% recht hoch. Sie sinkt zunächst von 7.5% bei einer Chopperfrequenz von 1  $Hz$  auf 2.5% bei 6  $Hz$  und steigt dann wieder langsam an bis auf einen Wert von 6.5% bei 15  $Hz$ . Wie auch in Abbildung 3.7 bereits zu erkennen liegt die prozentuale Varianz 5  $Hz$  mit 5.35% deutlich über der von 4  $Hz$  (3.1%) und der von 6  $Hz$  (2.5%).

### 3.2.3.1.2. Bewertung der Ergebnisse

Die exponentielle Abnahme der Sensorantwort mit zunehmender Frequenz hängt mit den Expositionszeiten zusammen, die nicht linear, sondern durch das Erhöhen um ganzzahlige Frequenzen exponentiell verkürzt wurden. Eine Liste mit den Expositionszeiten bei jeder Frequenz kann im Anhang unter Tabelle A.1 gefunden werden.

Obwohl die berechneten prozentualen Varianzen noch groß sind, zeigen sie

bereits, dass der Sensor mit dem kapazitiven Wegaufnehmer eine deutlich höhere Reproduzierbarkeit aufweist als dies bei dem Elektret-Mikrofon der Fall war.

### 3.2.3.2. Reproduzierbarkeit der Messwerte nach dem neuen Befüllen

Um lediglich den Einfluss eines Auswechslens des Fluids ohne das für einen Membranwechsel notwendige Verschrauben der Membran zu untersuchen, wurde der Sensor achtmal neu mit Wasser befüllt. An der Membran wurden keine Änderungen vorgenommen. Als Absorber wurde wieder ein 1 mm dicker PVC-Absorber verwendet.

#### 3.2.3.2.1. Ergebnisse

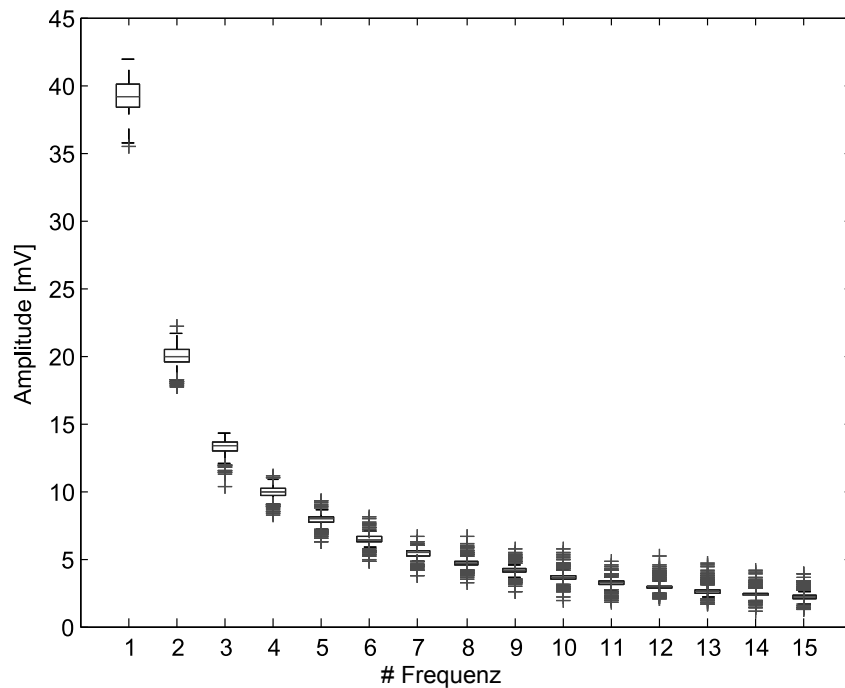
Die ermittelten Antwortamplituden des Sensors sind in Form eines Boxplots in Abbildung 3.8 über die jeweiligen Chopperfrequenzen von 1 – 15 Hz aufgetragen. Zudem wurden die Daten weitergehend ausgewertet und die Empfindlichkeit und das Signal-to-Noise-Ratio (SNR) berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 3.2 zu finden.

**Tabelle 3.2.:** Gemitteltetes Signal-to-Noise-Ratio (SNR) und Empfindlichkeit ( $\mathfrak{R}$ ) von acht Messungen mit einem jeweils neu befüllten Sensor für die Frequenzen (f) 1 – 15 Hz. Sensor mit Wasserfüllung und 1 mm PVC-Absorber.

<b>f [Hz]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
$\bar{x}$ $\mathfrak{R}$ [V/W]	0.85	0.43	0.29	0.21	0.17	0.14	0.12	0.10
$\bar{x}$ SNR	257.75	131.27	87.23	65.30	51.76	42.32	35.53	31.15
<b>f [Hz]</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	
$\bar{x}$ $\mathfrak{R}$ [V/W]	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	
$\bar{x}$ SNR	27.05	24.09	20.98	19.26	17.21	15.69	14.31	

Wie in Abbildung 3.8 zu erkennen ist, zeigen die einzelnen Messkurven hier den gleichen exponentiell abfallenden Verlauf, wie er bereits in Abbildung 3.7 in Abschnitt 3.2.3.1 auftrat. Auch hier wurden wieder die prozentualen Varianzen der Messergebnisse für alle Chopperfrequenzen ermittelt. Für alle acht Befüllungen ergibt sich eine prozentuale Varianz von maximal 0.66% für alle Frequenzen. Wird jedoch die erste Befüllung aus der Auswertung eliminiert, zeigt sich eine prozentuale Varianz von nur 0.3% bis 0.31%. Die erste Befüllung hat also eine deutlich größere Varianz als alle weiteren Befüllungen.

Die Empfindlichkeit, also das Verhältnis von der Höhe der Antwortamplitude zur am Absorber auftreffenden IR-Strahlung, ist für alle acht Befüllungen in Tabelle



**Abbildung 3.8.:** Boxplot der Messergebnisse, die mit einem achtmal neu befüllten Sensor für die Chopperfrequenzen von 1 – 15  $Hz$  aufgenommen wurden. Sensor mit Wasserfüllung und 1  $mm$  dickem PVC-Absorber.

3.2 aufgetragen. Diese nimmt wie auch das Signal-to-Noise-Ratio mit zunehmenden Expositionsfrequenzen ab.

### 3.2.3.2.2. Bewertung der Ergebnisse

Ein Vergleich der Varianzen aus diesem Versuch und dem vorhergegangenen Versuch mit neu eingesetzten Membranen zeigt, dass die Messungen für die nur die Befüllung gewechselt wurde eine deutlich geringere prozentuale Varianz aufweisen als die Messungen mit neu eingesetzten Membranen.

Die deutlich erhöhte Varianz der ersten Befüllung kommt durch ein erkennbar stärkeres Rauschen der Messungen zu Stande, das wahrscheinlich durch Vibrationen am schwingungsgedämpften Tisch verursacht wurde. Anders als bei den Versuchen mit dem Elektret-Mikrofonen zeigt sich hier, dass es keine starke Beeinflussung der Messsignale durch einen FET mit eingebauten DC-Remove gibt dessen Zeitkonstante für die gemessenen Frequenzen zu gering ist. Die Reproduzierbarkeit



konnte durch das Verzichten auf einen Membranwechsel zwischen den Messungen deutlich erhöht werden.

### 3.2.3.3. Reproduzierbarkeit der Daten ohne Änderungen der Sensorkonfiguration

Zur Untersuchung, ob der Sensor unter gleichbleibenden Bedingungen auch immer ein nahezu gleiches Signal ausgibt, wurden mit dem Sensor neunmal hintereinander 100 identische IR-Expositionen aufgenommen und ausgewertet. Die Expositionen erfolgten wieder mit Frequenzen von 1 – 15  $Hz$  bei einer Strahlungsintensität von  $260 W/m^2$ . Auch hier wurde als Sensorfüllung Wasser genutzt und als Absorber ein 1  $mm$  dicker PVC-Absorber verwendet.

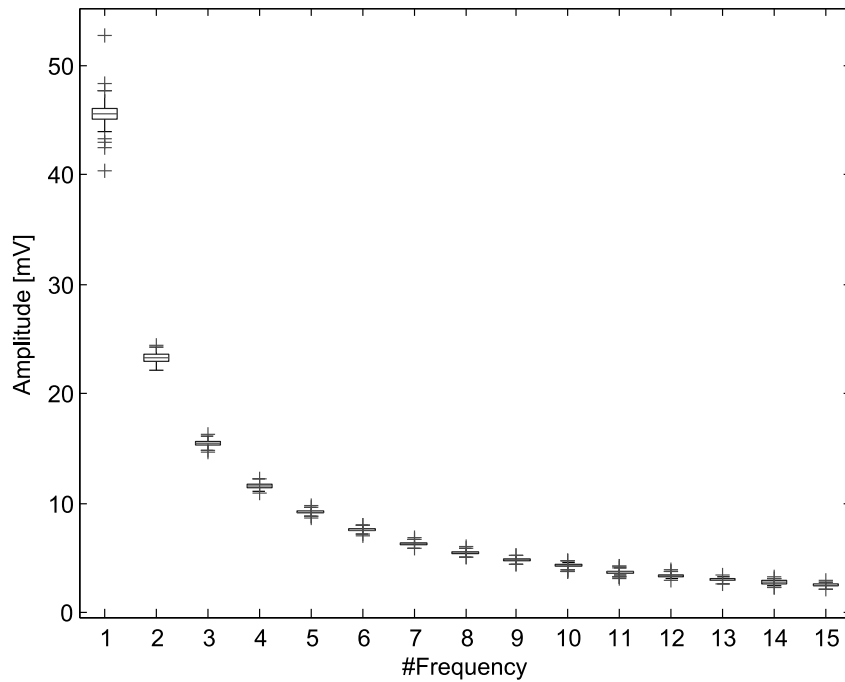
#### 3.2.3.3.1. Ergebnisse

Abbildung 3.9 zeigt den bereits aus den Versuchen (1) und (2) bekannten exponentiell abfallenden Verlauf der Antwortamplituden bei zunehmender Frequenz. Die Sensorantwort ist insgesamt etwas stärker als bei den vorangegangenen Messungen und die Varianzen sind für alle Frequenzen sehr klein. Auch die prozentualen Varianzen der Messergebnisse zeigen Werte von nur 0.184% bis 0.199% über alle Frequenzen und sind somit ebenfalls klein.

#### 3.2.3.3.2. Bewertung der Ergebnisse

Die Höhe der Antwortamplituden weicht zu den vorherigen Antwortamplituden aufgrund eines Wechsels der Membran vor Beginn der Messungen und einer damit einhergehenden Veränderung der Membranspannung ab. Wie bereits in Versuch (1) gezeigt, kann dies zu einer deutlichen Veränderung der Messergebnisse führen; in diesem Falle zu etwas größeren Antwortamplituden als bei den vorangegangenen Messungen. Wie erwartet sind die Varianzen nochmals deutlich kleiner als bei den Versuchen (1) und (2). Die prozentualen Varianzen der Messungen sind die kleinsten, die in den bisherigen drei Messkonfigurationen ermittelt wurden; die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist hier also am höchsten. Die dennoch vorhandenen Varianzen zwischen den einzelnen Messungen kommen vermutlich durch äußere Einflüsse wie die Änderung der Temperatur oder auch durch minimale Vibrationen des schwingungsgedämpften Tisches zustande.

Eine Berechnung der Noise-Equivalent-Power auf Basis der Messergebnisse einer Chopperfrequenz von 1  $Hz$  ergibt einen Wert von  $NEP'' = 2.08 W/m^2$ ; berechnet mit folgenden Parametern:  $U_r = 3.6531 \cdot 10^{-4} V$ ,  $\Re = 0.99 V/W$  und einer



**Abbildung 3.9.:** Boxplot der Messergebnisse mit einem wassergefüllten Sensor für Expositionsfrequenzen von 1–15  $Hz$  und 1  $mm$  PVC-Absorber. Die Sensorfüllung und -membran wurden nicht ausgetauscht.

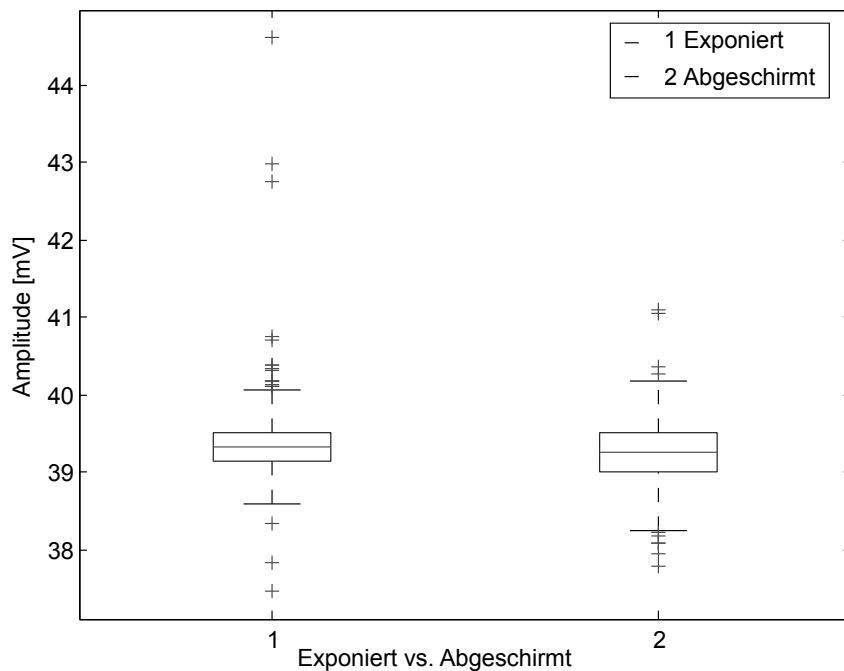
Absorberfläche von  $1.7671 \cdot 10^{-4} m^2$ . Die  $NEP''$  ist also circa sechsmal größer als bei einer Verwendung eines Elektret-Mikrofons als Ausleseeinheit.

### 3.2.3.4. Einfluss einer Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils auf die Messergebnisse

Im folgenden Versuch soll der Einfluss einer Infrarotabschirmung der Sensorbasis und des Ventils untersucht werden. Durch eine Abschirmung der Sensorbasis mit Aluminiumfolie wurde nur der Absorber der IR-Strahlung exponiert. Wie auch in den vorherigen Versuchen wurde der Sensor einer IR-Intensität von  $260 W/m^2$  exponiert. Für insgesamt fünf Messwiederholungen wurden je 100 Expositionen mit einer Chopperfrequenz von  $1 Hz$  aufgenommen. Der Sensor war mit Wasser gefüllt; es wurde ein 1  $mm$  dicker PVC genutzt. Die Messungen mit dem abgedeckten und freiliegendem Ventil wurden hintereinander aufgenommen, wobei der Sensor zwischen den Messungen nicht neu befüllt wurde.

### 3.2.3.4.1. Ergebnisse

In Abbildung 3.10 ist ein Boxplot der gemessenen Antwortamplituden des abgeschirmten und unabgeschirmten Sensors gezeigt. Dieser zeigt nur einen sehr kleinen Unterschied zwischen den beiden Messkonfigurationen. Der Median der Messreihe mit exponierter Sensorbasis ist nur um etwa  $0.1\text{ mV}$  größer und die Varianzen der Messungen etwas kleiner, dafür finden sich jedoch mehr Ausreißer als bei einer Abschirmung der Sensorbasis. Ein Kruskal-Wallis-Test ergibt einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Konfigurationen ( $P=0.0002$ ).



**Abbildung 3.10.:** Einfluss einer Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils auf die Messergebnisse. Messung mit einer Expositionsfrequenz von  $1\text{ Hz}$ ; der Sensor wurde mit einer Wasserfüllung und einem  $1\text{ mm}$  dicken PVC-Absorber betrieben.  $N = 5$

### 3.2.3.4.2. Bewertung der Ergebnisse

Der signifikante Unterschied zwischen den beiden Messkonfigurationen kommt vermutlich durch das normale Rauschen zu Stande, dass durch kleine

Unterschiede in den Messbedingungen, wie leichte Temperaturänderungen oder Vibrationen, immer etwas variiert. Die Abweichungen der Messergebnisse der beiden Messkonfigurationen sind im Betrag so klein, dass für den praktischen Betrieb quasi kein Einfluss zu erkennen ist. Zudem liegen Abweichungen im Bereich der Varianz, die für Versuch (3) in diesem Abschnitt für wiederholte Messungen ohne Membran oder Fluidwechsel ermittelt wurde. Auf eine Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils wurde daher für die weiteren Versuche verzichtet.

### 3.2.3.5. Einfluss von Luftblasen im Sensor auf Messergebnisse

Vorversuche haben gezeigt, dass die Sensorantwort deutlich abnimmt, wenn sich Luftblasen in der Flüssigkeit in der Druckkammer befinden. Dies soll hier exemplarisch für alle Fluide und Absorberkombinationen anhand von vielen Luftblasen im Wasser bei Nutzung eines 0.5 mm dicken PVC-Absorbers gezeigt werden. Es wurden immer 100 Expositionen für je fünf neue Befüllungen gemessen. Die Messungen erfolgten abwechselnd zwischen der Messkonfiguration mit Luftblasen im Fluid und der Messkonfiguration ohne Luftblasen im Fluid bei einer Chopperfrequenz von 1 Hz.

#### 3.2.3.5.1. Ergebnisse

Die aufgenommenen Messwerte in Abbildung 3.11 zeigen deutlich, dass es bei einer Anwesenheit von Luftblasen im Wasser (Messkonfiguration 2) zu einer stark verringerten Antwortamplitude des Sensorsignals kommt. Zudem zeigt diese Messkonfiguration eine größere Varianz der Messergebnisse als die Messkonfiguration ohne Luft im Sensor (Messkonfiguration 1). Bei den Messungen in der Messkonfiguration ohne Luftblasen besteht eine der fünf aufgenommenen Messreihen vollständig aus Ausreißern. Die Antwortamplituden dieser Messreihe liegen zudem deutlich unter denjenigen der vier anderen Messungen der gleichen Messkonfiguration.

#### 3.2.3.5.2. Bewertung der Ergebnisse

Das geringere Sensorsignal einer der Messungen mit Messkonfiguration 1 wurde wahrscheinlich unbeabsichtigt durch kleinste Luftrückstände verursacht, die bei der neu Befüllung des Sensors in der Druckkammer verblieben sind. Dies zeigt, dass auch schon geringe Mengen Luft in der Flüssigkeit einen starken Einfluss auf die Messergebnisse haben können.

Da die Menge und Größe der Luftblasen im Wasser nicht definiert eingestellt

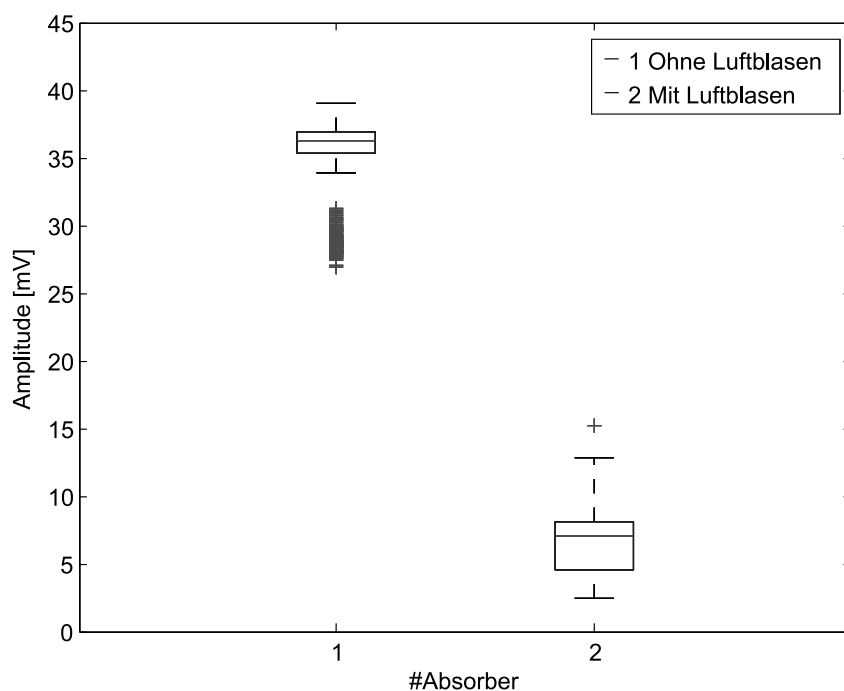


Abbildung 3.11.: Einfluss von Luftblasen auf die Messergebnisse.  $N = 5$

werden konnten, ist die Varianz bei den Messungen mit Luft im Wasser größer als bei denen mit blasenfreiem Wasser in der Druckkammer. Insgesamt zeigten die Messungen einen deutlichen negativen Einfluss von Luftblasen in der Druckkammer auf die Stärke der Sensorantwort. Bei allen folgenden Versuchen müsste also auf ein blasenfreies Befüllen der Druckkammer geachtet werden. Ganz ausschließen lassen sich geringste Mengen an kleinen Luftblasen aber nie, so dass mit einer gewissen Varianz der Messwerte immer gerechnet werden muss.

### 3.2.3.6. Bewertung der Reproduzierbarkeit des Sensors mit kapazitivem Wegaufnehmer aus Ausleseinheit

Da ein Vergleich der Experimente (1) und (2) zeigt, dass die Varianzen zwischen den jeweils neu aufgenommenen Messreihen deutlich kleiner ist, wenn nur die Befüllung und nicht die Membran gewechselt wird, wurde in den Messungen der folgenden Versuche in den Abschnitten 3.3 und 3.4 lediglich die Befüllung gewechselt.

Die geringste Varianz und somit die höchste Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zeigt der Sensor, wie erwartet, für Messwiederholungen, für die keine Änderungen

am Sensor vorgenommen wurden (3). Auch die in Versuch (4) durchgeführte Untersuchung zum Einfluss einer Abschirmung der Sensorbasis und des Ventils auf die Messungen zeigt, dass mit einem in die Sensorbasis integrierten Ventil eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ohne einen großen Einfluss einer Bestrahlung der Sensorbasis zu erwarten ist.

Für den Fall, dass eine Membran ausgetauscht werden musste, wurde hier gezeigt, dass dies zu einer Änderung der Amplitudenstärke führen konnte. Diese Änderung der Amplitudenstärke veränderte aber nicht gänzlich das Antwortverhalten des Sensors wie es für die Membranen bei Nutzung der Elektret-Mikrofone gezeigt werden konnte. Für jedes folgende Experiment, in dem ein Vergleich zwischen verschiedenen Absorbern oder Fluiden gezogen wurde, wurde dennoch immer die gleiche Membran verwendet, so dass es nicht durch Membranwechsel zu verfälschten Auswertungen innerhalb eines Experiments kommen konnte. Wurden Vergleiche zwischen verschiedenen Experimenten gezogen, wurden erfolgte Membranwechsel immer im Text angegeben und bei der Diskussion berücksichtigt.

Besonderes Augenmerk musste immer auf ein blasenfreies Befüllen gelegt werden. Wie Versuch (5) gezeigt hat, hat Luft eine signifikante Verringerung der Stärke der Sensorantwort zur Folge.

### 3.2.4. Fazit aus den Experimenten zur Auswahl der Ausleseeinheiten

Die verschiedenen getesteten Sensorbasen und Ausleseeinheiten zeigen deutliche Unterschiede in den Sensorantworten und haben alle gewisse Vor- und Nachteile. Diese sollen für die Ausleseeinheiten nach den in Tabelle 3.3 aufgeführten Kriterien diskutiert werden. Für die nachfolgenden Experimente soll nur eine Ausleseeinheit verwendet werden, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Da die Sensorbasis ohne Ventil und mit eingeklebter Membran keine ausreichende Reproduzierbarkeit zeigte, wurde nur die Sensorbasis mit Ventil weiter verwendet.

Während der genutzte kapazitive Wegaufnehmer mit einem Preis von mehreren Tausend Euro bei den Kosten für eine breitere Anwendung nicht überzeugt, werden alle anderen Kriterien sehr gut erfüllt. Die hohen Kosten für das System relativieren sich zudem, wenn die gute Wiederverwendbarkeit für die verschiedenen Sensorkonfigurationen in den folgenden Versuchen bedacht wird. Ein wichtiger Vorteil dieses Systems war zudem, dass das System geeicht war, so dass Abweichungen in der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sehr wahrscheinlich auf äußere Faktoren zurückzuführen waren. Da der Ausgang des Wegaufnehmers ein analoges Spannungssignal zur Verfügung stellte, konnte es unmittelbar an das in Abschnitt 2.2.1.2.1 vorgestellte CED-System angeschlossen werden. Für die Digitalisierung von Spannungssignalen

**Tabelle 3.3.:** Kriterienkatalog zur Auswahl der Ausleseeinheit.

Reproduzierbarkeit: Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, Empfindlichkeit: Empfindlichkeit des Sensors mit der jeweiligen Ausleseeinheit,  $NEP''$ : Noise-Equivalent-Power, Verfügbarkeit: Verfügbarkeit der Ausleseeinheit in ausreichender Menge, Wiederverwendbarkeit: Wiederverwendbarkeit der Ausleseeinheit in anderen Sensorkonfigurationen, Kosten: Kosten des Auslesesystems, Kompatibilität: Kompatibilität der Ausleseeinheit mit dem bestehenden DAQ-Systems. +  $\hat{=}$  gut, o  $\hat{=}$  ausreichend, -  $\hat{=}$  schlecht.

	Wegaufnehmer	Elektret-Mikrofon	FZ caesar
Reproduzierbarkeit	+	o	-
Empfindlichkeit	+	o	-
$NEP''$	+	o	o
Verfügbarkeit	+	+	-
Wiederverwendbarkeit	+	o	-
Kosten	-	+	?
Kompatibilität	+	+	-

existiert insgesamt eine große Auswahl an Analog/Digital-Wandlern mit verschiedenen Sensitivitäten und Abstraten bis in den GHz Bereich, z.B. der AD9625 Chip (Firma Analog Devices Inc., (USA)) oder auch fertige kommerziell erhältliche Data-Acquisition-Systeme (DAQ-Systeme) wie das genutzte CED-System. Zudem zeigen die Messungen mit dem Wegaufnehmer die höchste Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei gleichzeitig höchster Empfindlichkeit und geringster Noise-Equivalent-Power ( $NEP''$ ).

Anders war dies bei den getesteten Prototypen aus dem FZ caesar. Ein großes Problem dieser Prototypen war die beschränkte Auslesefähigkeit durch den CDC, der nicht mit den vorhandenen DAQ-Systemen kompatibel war (siehe Abschnitt 3.2.1.4), sondern über eine I2C-Schnittstelle mit dem Computer verbunden werden musste. Die Messungen mit den Prototypen aus dem FZ caesar aus Abschnitt 3.2.1 haben keine ausreichende Empfindlichkeit und Reproduzierbarkeit zeigen können. Für die in dieser Arbeit geplanten Versuche war dieses System also nicht geeignet, auch wenn ein grundsätzliches Funktionieren dieses Auslesesystems zumindest für Luft bestätigt werden konnte (siehe auch die Arbeit von Schossig et al. (2013), in der eine Mikrogolayzelle mit gleichem Ausleseprinzip verwendet wurde). Da die einzelnen Sensoren irreversibel verklebte Systeme waren, konnte der Plattenkondensator, der in diesen zur Signalgenerierung genutzt wurde, nicht für andere Sensorkonfigurationen wiederverwendet werden. Dies schränkte die Verfügbarkeit deutlich ein, besonders da die Sensoren Einzelanfertigungen mit einer langen Prozessdauer aus

dem Reinraum des FZ caesar waren. Aus diesem Grund ist auch eine Aussage über den Preis eines solchen Sensors nicht möglich.

In den Elektret-Mikrofonen wird das kapazitive Signal, anders als bei den Sensoren aus dem FZ caesar, direkt in eine Spannungsänderung überführt. Dies führt dazu, dass die Elektret-Mikrofone an das CED-System angeschlossen werden konnten. Durch den in einem FET eingebauten DC-Remove mit einer sehr kleinen Zeitkonstante wurde die Empfindlichkeit des Sensors bei niedrigen Frequenzen deutlich beschnitten. Da sich die Mikrofone einfach in die bestehende Sensorbasis integrieren lassen, sind sie auch gut auch für Sensorkonfigurationen mit anderen Fluiden und Absorbern wiederverwendbar. Zudem sind sie mit einem Preis von wenigen Euro pro Stück im normalen Elektronikhandel nicht nur günstig, sondern auch gut verfügbar. Auch wenn die Elektret-Mikrofone einige der wichtigen Kriterien erfüllen; die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse konnte nicht überzeugen.

Die relativ hohen ermittelten Empfindlichkeiten, die gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und die geringen  $NEP''$ -Werte des Sensors mit dem kapazitiven Wegaufnehmer als Ausleseeinheit empfohlen dessen Verwendung in den folgenden Versuchen.

### 3.3. Evaluation von verschiedenen Absorbern

Im folgenden Kapitel soll der Einfluss von verschiedenen Absorbermaterialien auf die Messergebnisse evaluiert werden. Hierfür wurden zunächst Messungen mit 1 mm und 0.5 mm dicken Absorbern aller verwendeten Materialien durchgeführt (siehe Abschnitt 3.3.1). Anschließend wurden weitere Messungen mit modifizierten Absorbern sowie Simulationen durchgeführt, um die ermittelten Ergebnisse besser zu verstehen und den Sensor weiter zu optimieren.

#### 3.3.1. Vergleich von verschiedenen Absorbern

In einem ersten Versuch wurden die Antwortamplituden des Sensors mit verschiedenen Absorbern auf eine Exposition mit 46 mW Infrarotstrahlung gemessen (siehe Abbildung 3.12). Der Sensor wurde mit jedem Absorber in abwechselnder Reihenfolge neunmal ausgerüstet. Für jede neue Datenaufnahme wurde der Sensor neu mit Wasser befüllt. Für den Absorber aus 0.5 mm CFRP existiert nur eine einzelne Messung, da das Gewinde beschädigt wurde. Da sich das Material als zu spröde für eine weitere Verwendung als Absorber herausgestellt hat, wurden keine neue Absorber aus CFRP gefertigt.



### 3.3.1.1. Ergebnisse

Werden die 13 getesteten Absorber in Abhängigkeit ihrer Dicke (0.5 *mm* vs. 1 *mm*) miteinander verglichen, zeigt sich, dass bei einigen Absorbern die Dicke mit der Stärke der Sensorantwort korreliert. So zeigen Messungen mit 1 *mm* dicken Absorbern aus PVC, PE und FullCure720 deutlich größere Antwortamplituden als ihre Gegenstücke mit einer Dicke von 0.5 *mm*. Dies sind alle Materialien mit großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und, bis auf PE, schlechter Wärmeleitfähigkeit.

Bei Kupfer, CFRP und PEEK-HPV, also Materialien mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und einer hohen Wärmeleitfähigkeit, ergeben die Messungen eine stärkere Sensorantwort bei einer Nutzung der 0.5 *mm* dicken Absorber. Allerdings sind die Antwortamplituden hier deutlich kleiner als bei den anderen Absorbern und die Unterschiede zwischen den beiden getesteten Absorberdicken betragen nur wenige Zehntel oder Hundertstel Millivolt. Messungen mit einem IR-transmissiven Fenster zeigen ebenfalls sehr geringe Sensorantworten.

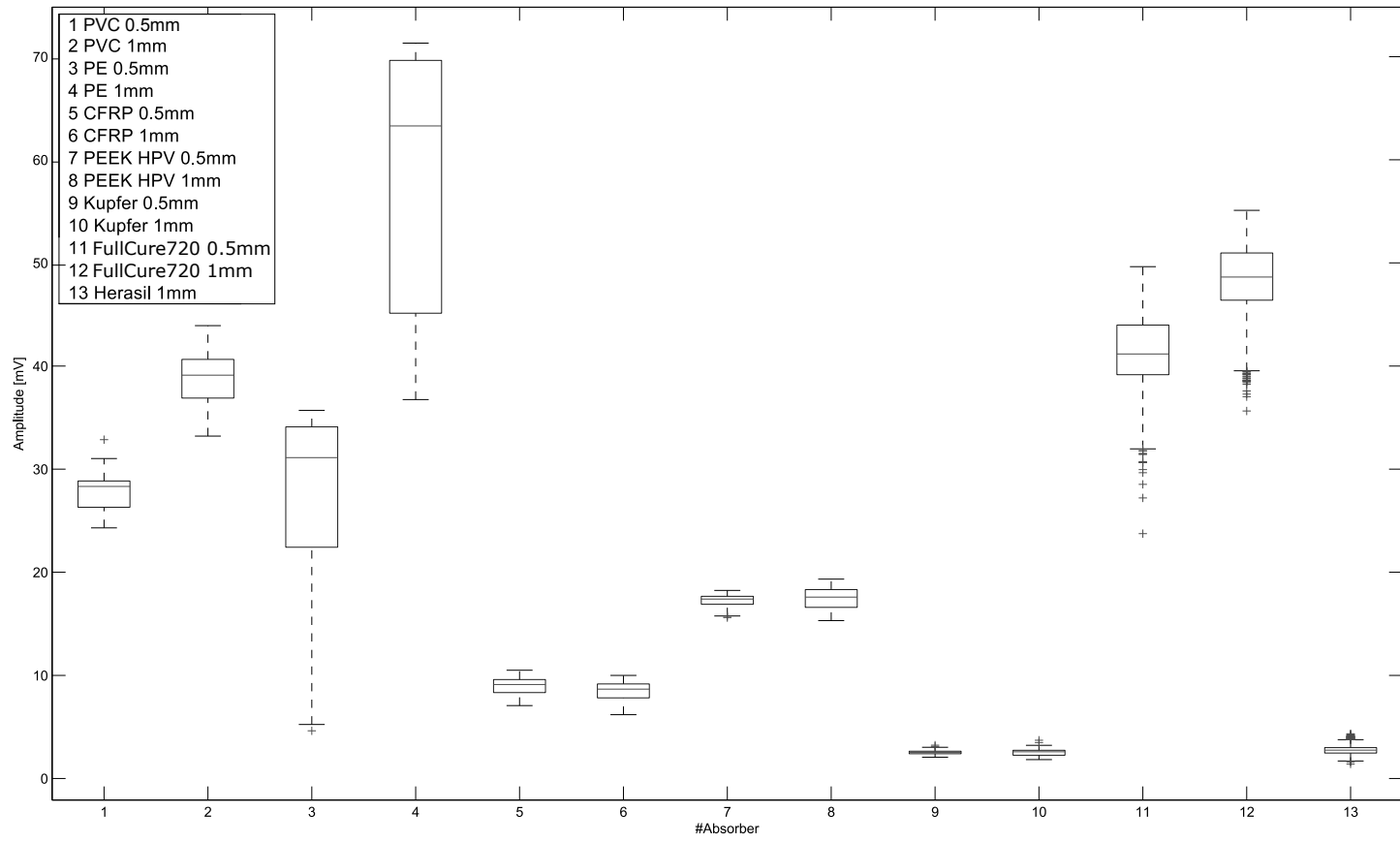
Signifikanzanalysen mithilfe eines Kruskal-Wallis-Tests zeigen, dass sich, außer bei PEEK-HPV mit  $P = 0.23$ , alle Messergebnisse mit 1 *mm* dickem Absorber signifikant von den Messungen mit dem 0.5 *mm* dicken Absorber aus dem gleichem Material unterscheiden. Während der Unterschied bei PVC, PE, CFRP und Fullcure720 hochsignifikant ist ( $P < 0.001$ ), ist der Unterschied bei Kupfer lediglich signifikant ( $P < 0.05$ ).

Die Messungen mit den unterschiedlichen Materialien zeigen zum Teil deutliche Unterschiede in der Varianz der Antwortamplituden. Besonders die Materialien mit hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie PE und FullCure720 zeigen auch eine deutlich erhöhte prozentuale Varianz.

### 3.3.1.2. Bewertung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass ein hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient wie etwa bei PE, PVC und FullCure720 einen sehr großen Einfluss auf die Höhe der Antwortamplituden hat. Da besonders bei diesen drei Absorbermaterialien eine deutliche Korrelation zwischen dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der Sensorantwort besteht, obwohl die thermischen Ausdehnungskoeffizienten deutlich geringer als die des Wassers sind, zeigt dies, dass das Wasser bei diesen Absorbern offenbar keinen oder nur einen kleinen Einfluss auf die Stärke der Sensorantwort hat.

Anders scheint dies bei Absorbern aus PEEK-HPV, CFRP und Kupfer zu sein, bei denen eine Ausdehnung des Fluids offenbar die verringerte Ausdehnung des



Materials der dünnen Absorber ausgleichen kann. Der Beitrag des Wassers zur Gesamtausdehnung des Sensors reicht jedoch scheinbar noch nicht aus, um mit dem dünneren Absorber deutlich größere Antwortamplituden zu generieren als mit dem dickeren Absorber. Beim IR-transmissiven Fenster kommt es, aufgrund der IR-Transmissivität des Materials, zu einer Sensorantwort, die hauptsächlich durch die Ausdehnung des Fluids bedingt ist.

Die großen prozentualen Varianzen bei PE und FullCure720 lassen sich wahrscheinlich wie folgt erklären: Durch die geringe Dichte des PE hatte dieses einen stetigen Auftrieb, wenn es unter die Wasseroberfläche gebracht wurde, um den Sensor zu verschließen. Hierdurch könnten sehr kleine Luftblasen am Absorber verblieben sein, die das Sensorsignal negativ hätten beeinträchtigen können (siehe Abschnitt 3.2.3.5). Zudem ließ sich der Absorber deutlich schlechter verschrauben als die anderen, da er sehr schwer zu handhaben war. Hierdurch könnte es zu einem Eindringen von geringen Luftmengen während der Messungen gekommen sein.

Das FullCure720 wiederum zeigte ein Quellverhalten im Wasser, wodurch es möglicherweise zu Druckveränderungen in der Druckkammer kommen konnte, die nicht direkt auf eine Exposition zur IR-Strahlung zurückzuführen sind.

Um den Einfluss der Sensorfüllung bei der Verwendung verschiedener Absorbermaterialien weiter zu untersuchen, wurden weitere Messungen und Simulationen mit unterschiedlichen Absorbern verschiedener Dicken durchgeführt, siehe dazu Abschnitt 3.3.5.

Zuvor sollen jedoch noch weitere Faktoren, wie der Einfluss der IR-Absorptionsbanden der verschiedenen Absorber (Abschnitt 3.3.2) und die Absorber- beziehungsweise Basisausdehnung (Abschnitt 3.3.3) untersucht werden, um Einflüsse dieser Faktoren zu identifizieren.

### 3.3.2. Beschichtung der Absorber

Zur Untersuchung des Einflusses der Absorptionseigenschaften der verschiedenen Materialien auf Sensorantworten wurden die Absorber mit Grafitsspray beschichtet. Hierdurch erhielten alle Absorber das gleiche Absorptionsspektrum. Mögliche Abweichungen der Messergebnisse von denen aus Abschnitt 3.3.1 lassen sich als Verbesserung oder Verschlechterung der Absorptionsstärke deuten und lassen so eine Aussage über die Qualität der Absorptionseigenschaften der Absorber zu. Der Ver-

---

**Abbildung 3.12. (gegenüberliegende Seite):** Vergleich der Sensorantworten bei Nutzung von 13 verschiedenen Absorbern aus sieben verschiedenen Materialien. Als Sensorfüllung wurde Wasser verwendet.  $N = 9$

suchsaufbau und die verwendeten Methoden entsprechen denen in den Abschnitten 2.2.2.1 und 2.2.2.2 vorgestellten. Abweichungen hiervon und eine detaillierte Beschreibung des Beschichtungsvorgangs sind in Abschnitt 2.2.2.4 erklärt.

### 3.3.2.1. Einfluss der Beschichtungsdicke

Um sicherstellen zu können, dass eine Beschichtung der Absorber mit Grafit auch reproduzierbar gleiche Sensorantworten ergibt und um den Einfluss kleiner Abweichungen in der Schichtdicke zu untersuchen, wurde zunächst die Schichtdicke der Grafitbeschichtung auf einem 1 mm dicken Kupferabsorber erhöht.

#### 3.3.2.1.1. Ergebnisse

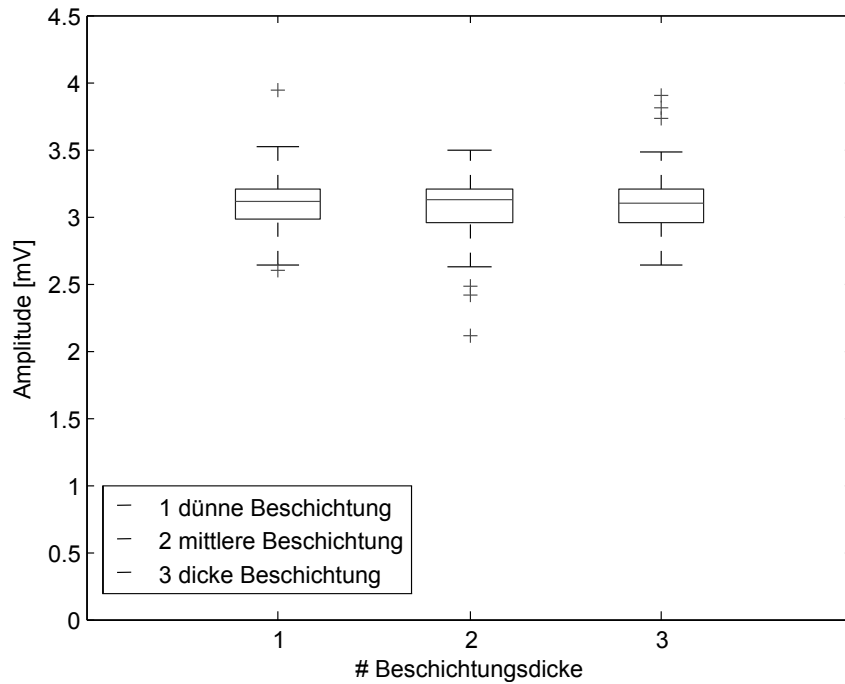
In Abbildung 3.13 sind die Sensorantworten auf die IR-Expositionen als Boxplot aufgetragen. Alle drei Konfigurationen zeigen nur eine geringe Abweichung  $< 1 \text{ mV}$  voneinander. Eine statistische Analyse mithilfe eines Kruskal-Wallis-Tests zeigt, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sensorantworten bei den untersuchten Grafitbeschichtungsdicken gibt (siehe Tabelle 3.4).

**Tabelle 3.4.:** Kruskal-Wallis-Analysen der Sensorantworten bei Nutzung eines 1 mm Kupferabsorbers mit verschiedenen Grafitbeschichtungsdicken. Als Sensorfüllung wurde Wasser verwendet.

	P-Wert
dünn gegen mittel	0.73
mittel gegen dick	0.51
dünn gegen dick	0.28

#### 3.3.2.1.2. Bewertung der Ergebnisse

Wie die Kruskal-Wallis-Analysen zeigen, gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Grafitbeschichtungsdicken. Da in den folgenden Versuchen nur eine einfache Schichtdicke genutzt wird, werden alle Abweichungen der Dicke der Grafitbeschichtungen in jedem Fall kleiner sein als in diesem Versuch in dem Unterschiede bis zu drei Schichtdicken bestanden. So kann ausgeschlossen werden, dass kleine Unterschiede in der Schichtdicke dort einen Einfluss auf die Messergebnisse hatten. Auf eine aufwändige Art der Beschichtung,



**Abbildung 3.13.:** Vergleich der Sensorantwort eines 1 mm Kupferabsorbers mit verschiedenen Grafit-schichtdicken. Als Sensorfüllung wurde Wasser verwendet.  $N = 4$

die immer in einer mikrometeregenauen Schichtdicke resultiert, kann also verzichtet werden.

### 3.3.2.2. Vergleich zwischen beschichtet und unbeschichtet

Um die Auswirkung einer Absorberbeschichtung auf die Sensorantworten zu untersuchen, wurde dieser Versuch durchgeführt. Aufgrund der Wasserunlöslichkeit des genutzten Grafit wurde die Absorption des Wassers durch Tinte verbessert. Die genaue Methode ist in Abschnitt 2.2.2.4 erläutert.

#### 3.3.2.2.1. Ergebnisse

In Tabelle 3.5 sind die mittleren prozentualen Veränderungen der Antwortamplituden nach einer Beschichtung mit Grafit aufgelistet. Eine Erhöhung der Antwortamplitude und damit vermutlich auch eine Verbesserung der

## Kapitel 3. Ergebnisse

---

Absorptionseigenschaften konnte beim Kupferabsorber festgestellt werden, bei dem durch die Beschichtung eine Erhöhung der Antwortamplitude von 30% erreicht wurde. Zudem zeigte sich, dass eine Beschichtung des IR-transmissiven Fensters zu einer Erhöhung der Antwortamplitude von 15% führte.

Gerade bei Kupfer und dem IR-transmissiven Fenster zeigten sich jedoch auch sehr große Varianzen bei den Messungen mit einem beschichteten Absorber. Beim Fenster weicht die Varianz um 40% von der mittleren Amplitude ab.

Bei allen anderen Absorbern führte die Beschichtung hingegen zu einer Verringerung der Antwortamplitude um bis zu 15%. Für Wasser, welches mit Tinte versetzt wurde, zeigt sich nur eine minimale Verringerung der Antwortamplitude von weniger als 0.5% mit einer sehr geringen Varianz von weniger als 0.1%.

**Tabelle 3.5.:** Mittlere Veränderung der Antwortamplituden (Amp) und deren Varianz (Var) nach Auf- bzw. Einbringen einer zusätzlichen Absorberschicht bei verschiedenen Absorbermaterialien

	$\Delta\bar{x}$ Amp in %	$\bar{x}$ Var in %	N=
PVC 1 mm	-8.86	1.4065	10
PE 1 mm	-15.0688	1.3518	10
PEEK-HPV 0.5 mm	-7.0107	3.2403	10
Kupfer 0.5 mm	29.6429	16.5423	10
FullCure720 1 mm	-4.2359	8.7258	7
IR-trans. Fenster	15.079	43.907	5
Wasser mit Tinte	-0.4892	0.0644	5

### 3.3.2.2.2. Bewertung der Ergebnisse

Die Unterschiede zwischen den beschichteten und unbeschichteten Absorbern können auf zwei verschiedene Arten interpretiert werden. Es wäre möglich, dass die IR-Reflexion des Graphits höher ist als die der meisten Absorber und somit weniger Strahlung absorbiert werden kann. Möglich wäre aber zunächst auch eine Verbesserung der Absorption und eine damit einhergehende dünnere erwärmte Grenzschicht im Absorber, die die Wärme wieder an die umgebende Luft abgibt. Zumindest beim Versuch, in dem die Sensorantworten des IR-transmissiven Fensters und Tintenzugabe in der Wasserfüllung gemessen wurde, ist wahrscheinlich aus diesem Grund die Sensorantwort kleiner geworden (siehe unten).

Da die anderen Absorber, bis auf Kupfer, aber deutlich besser thermisch isolieren als das IR-transmissive Fenster, könnte die Veränderung der Stärke der Sensorantworten wahrscheinlich eher an einer Erhöhung der Reflexion liegen.

Die genauen Absorptions-, Transmissions-, und Reflexionskurven des genutzten Grafit sind nicht bekannt, vergleichbare Werte sind jedoch in Abschnitt 2.2.2.4 zu finden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Reflexion der allermeisten genutzten Absorber niedriger ist als die von Kupfer und dem IR-transmissiven Fenster. Besonders hochgradig poliertes Kupfer ist als guter IR-Reflektor (Reflexionsgrad  $> 99\%$ ) bekannt und wird häufig in Spiegeln für IR-Strahlung genutzt. Eine Verbesserung der Sensorantwort durch eine Verringerung der Reflexion ist hier also wahrscheinlich, auch wenn der Reflexionsgrad des hier verwendeten Kupfers aufgrund seiner Oberflächenrauheit sicher niedriger liegt. Da die Wärmeleitfähigkeit des Grafit allerdings niedriger ist als die des Kupfers, wäre es auch möglich, dass die Verbesserung aus einer besseren Isolierung gegen Wärmeverlust resultiert. Das als IR-transmissive Fenster genutzte Herasil hat im Bereich von  $3 - 5 \mu\text{m}$  einen Reflexionsgrad von etwa  $5\%$  und liegt damit unter der Reflexion von Grafit (Siehe Abschnitt 2.2.2.4). Die Verbesserung der Sensorantwort muss hier also auf andere Faktoren zurückzuführen sein.

Möglicherweise gibt hier eine Simulation, durch die gezeigt werden konnte, dass viel Wärme direkt über das Fenster wieder verloren geht (Schmitz et al., 2012) bereits den richtigen Hinweis. Die Grafitsschicht könnte auch hier als zusätzlicher Isolator dienen, der die in das Fluid eingetragene Wärme während der weiteren Bestrahlung in der Flüssigkeit hält. Die Wärmeleitfähigkeit des Grafit ist allerdings deutlich größer als die des Fensters. Da es für diese Vermutung jedoch keine weitere Evidenz gibt, wird der Effekt der Beschichtung des Fensters durch Simulationen in Abschnitt 3.3.5.6 weiter untersucht.

Ob die Reflexionseigenschaften der genutzten Kunststoffe tatsächlich vorteilhafter für den Versuch sind als die Reflektivität des genutzten Grafit lässt sich aufgrund nicht vorhandener stoffspezifischer Reflexionskurven für die Kunststoffe nicht mit Bestimmtheit sagen.

Zumindest beim schwarzen PVC und schwarzen PE kann aber davon ausgegangen werden, dass die Absorptionsspektren durch das Einbringen von Industrie-Rußpartikeln („Carbon Black“) zur Schwärzung des Kunststoffes zu einer breitbandigeren Absorption hin verändert wurden. Hierdurch sollte die IR-Strahlung nahezu komplett von den Absorbern absorbiert werden und die Reflexion sollte minimal sein. Auch das PEEK-HPV und das CFRP sollten durch die Beimischung von Grafit bereits gute Absorber sein. Zudem sollte selbst bei einer hohen Transmission durch die Absorberschichtdicken von mindestens  $0.5 \text{ mm}$  alle Strahlung absorbiert werden. Die geringe Verschlechterung des Antwortsignals bei FullCure720 erklärt sich möglicherweise durch die sehr große Varianz der Messungen. Diese ist größer als die tatsächliche Veränderung des Antwortsignals durch das Beschichten mit Grafit, wodurch der Effekt der Beschichtung nicht

eindeutig als positiv oder negativ zu bestimmen ist. Die sehr geringe Veränderung des Antwortsignals durch die Schwärzung des Wassers mit Tinte deutet darauf hin, dass Wasser bereits sehr gut absorbiert. Die gemessene geringe Verschlechterung könnte in diesem Fall sowohl auf eine erhöhte Reflexion als auch eine erhöhte Absorption zurückzuführen sein. Wie in Klocke et al. (2011) gezeigt, kommt es durch die hohe Absorption des Wassers wahrscheinlich zu einem starken Verlust der Wärme durch das IR-transmissive Fenster. Dieser Effekt wäre bei einer noch stärker absorbierenden Flüssigkeit wahrscheinlich entsprechend höher.

### 3.3.3. Messung der Absorber- und Basisausdehnung

Um den Einfluss der Absorber auf die Membranauslenkung weiter zu untersuchen, sollen hier exemplarisch Messungen mit einem PVC-Absorber mit  $1\text{ mm}$  und  $0.2\text{ mm}$  Absorberschichtdicke und der Sensorbasis ohne Absorber gezeigt werden. Für die Messungen wurden nur die Ausdehnungen der Absorber bzw. der Sensorbasis alleine vermessen. Die genaue Beschreibung der Methode ist in Abschnitt 2.2.2.5 zu finden.

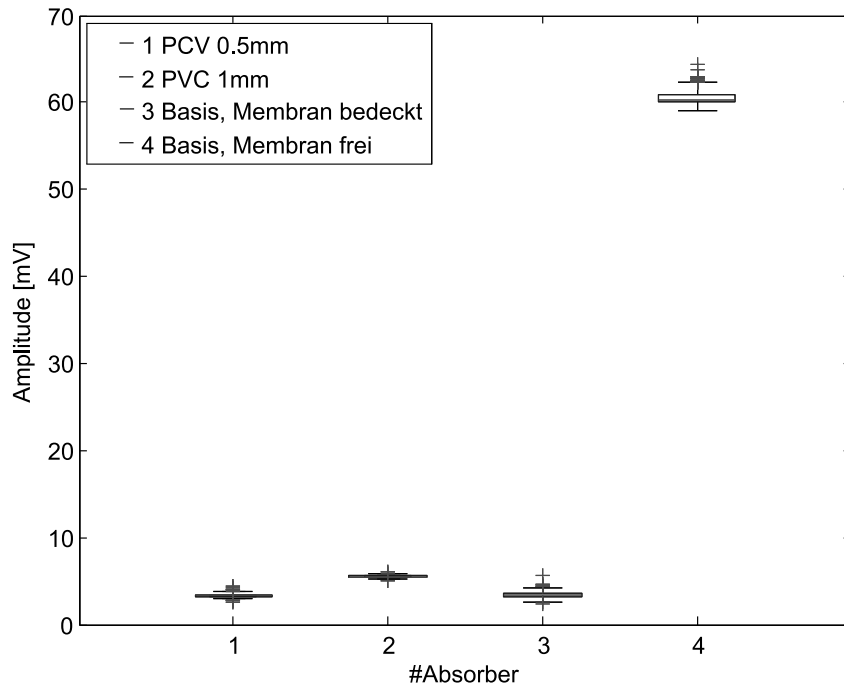
#### 3.3.3.1. Ergebnisse

In Abbildung 3.14 sind die gemessenen Werte als Boxplot aufgetragen. Der  $1\text{ mm}$  dicke Absorber aus PVC verursacht  $60\%$  höhere Antwortamplituden als der aus  $0.5\text{ mm}$  dickem PVC. Besonders hohe Sensorantworten konnten gemessen werden, wenn die Sensorbasis ohne Absorber mit IR-exponierter Membran vermessen wurde. Hier war die Sensorantwort um  $1760\%$  höher im Vergleich zu einer Bestrahlung der Basis, bei der die Membran beschattet war.

#### 3.3.3.2. Bewertung der Ergebnisse

Mit einer Differenz von  $60\%$  zwischen dem  $1\text{ mm}$  und dem  $0.5\text{ mm}$  dicken Absorber, der in diesem Experiment gemessen wurde, ist der Unterschied deutlich stärker ausgeprägt als bei den in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Vergleichsmessungen. Der geringere Unterschied in der Ausdehnung beim mit Wasser gefüllten Sensor lässt sich zum Einen durch die Eigenschaften der Membran erklären, die einer zunehmenden Ausdehnung einen immer größeren Widerstand entgegenbringt. Zum Anderen könnte dies möglicherweise auch an einer leichten, nach außen gerichteten Vorkrümmung der Absorberfläche liegen. Hierdurch könnte ein größerer Teil der Ausdehnung nach





**Abbildung 3.14.:** Antwortamplituden von 0.5 mm und 1 mm starken Absorbern aus PVC, sowie der Basis ohne Absorber mit beschatteter und unbeschatteter Membran

außen auftreten und so nicht zu einer Membranauslenkung beitragen. Dass eine Vorkrümmung einen großen Einfluss auf die Ausdehnungsrichtung haben kann, wurde durch Schneider and Schmitz (2014) anhand von Simulationen gezeigt.

Der große Einfluss der unbeschatteten Membran auf die Messergebnisse lässt sich durch eine Ausdehnung des Dichtungsgummis erklären, das auf der Membran aufliegt. Bedingt durch die Form des Gummis und das feste Anpressen der Membran wird das Gummi teilweise über die Membran geschoben und ist so ebenfalls der Strahlung exponiert. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Gummi ist mit Werten von  $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m/K}$  (Wacker Chemie AG, 2014) deutlich größer als der der Membran. Zudem ist die Dichtung mit einer Dicke von 1 mm erheblich dicker als die Membran mit 80  $\mu\text{m}$ , wodurch der Effekt der Ausdehnung im Vergleich zur Membran nochmal größer ist. Da dieser Effekt in Abschnitt 3.4.4 mit einer Sensorbasis, bei der die Dichtung nicht bestrahlt wurde, nicht auftrat, ist es sehr wahrscheinlich, dass der Effekt tatsächlich durch die Ausdehnung des Dichtungsgummis hervorgerufen wurde.

Da der in Abschnitt 3.2.3.4 beschriebene Versuch gezeigt hat, dass die Sensorbasis mit Ventil nur einen Anteil von  $0.1\text{ mV}$  an der gesamten Sensorantwort hatte, scheint die in diesem Versuch gemessene Sensorantwort von  $3\text{ mV}$  für die Sensorbasis ohne Absorber sehr hoch. Im dortigen Experiment wurde allerdings nicht mit einer der Strahlung exponierten Membran gemessen, sondern die Differenz zwischen einer beschatteten und exponierten Sensorbasis mit aufgeschraubtem Absorber bestimmt. Die stärkere Sensorantwort in diesem Experiment lässt sich somit wahrscheinlich auf das Fehlen des Absorbers zurückführen. Obwohl die Membran beschattet wurde, könnte sie sich möglicherweise passiv durch Konvektion oder Konduktion erwärmt und somit ausgedehnt haben. Diese Ausdehnung könnte fälschlicherweise als eine Ausdehnung der Sensorbasis interpretiert werden.

Da die Ausdehnungen der Absorber im Betrag insgesamt deutlich kleiner sind als die in Abschnitt 3.3.1 gemessenen Sensorantworten zeigt, dass das Fluid in der Sensorkammer auch unabhängig von seinem eigenen thermischen Ausdehnungsverhalten einen großen Einfluss auf die Funktion des Sensors hat. Möglicherweise wird der Druck, der durch die Ausdehnung des Absorbers in die Fluidkammer hinein entsteht, durch das Fluid ähnlich einer Linse gebündelt und auf die kleinere, dünne Auslesemembran „fokussiert“. Durch diesen hydraulischen Effekt könnte es zu einer stärkeren Membranauslenkung kommen als die in diesem Abschnitt gemessene reine Absorberausdehnung vermuten lässt.

### 3.3.4. Berechnung der Erwärmung der Absorber

Um einen Eindruck der Erwärmung der Absorber durch die Absorption der IR-Strahlung zu erhalten, werden erste orientierende Berechnungen nach der in Abschnitt 2.2.2.7 beschriebenen Methode durchgeführt.

#### 3.3.4.1. Ergebnisse

Die in Tabelle 3.6 gezeigten Temperaturen, um die sich die Absorber in der Berechnung erwärmen, lassen sich in drei Gruppen einteilen. PEEK-HPV und PVC erwärmen sich mit  $0.090\text{ K}$  am stärksten, gefolgt von PE und FullCure720, die sich mit  $0.074\text{ K}$  ebenfalls relativ stark erwärmen. Deutlich schlechter erwärmt sich das Kupfer mit nur  $0.038\text{ K}$  (siehe Tabelle 3.6).

**Tabelle 3.6.:** Berechnete Erwärmung eines 1 mm dicken Absorbers aus verschiedenen Materialien bei einem Wärmeenergieeintrag von 0.023 J. Formel für die umgestellte Wärmekapazität:  $\Delta T = Q/m \cdot c_p$  mit T=Temperatur, m = Masse und  $c_p$  = Wärmekapazität

Material	PEEK-HPV	PVC	PE	Kupfer	FullCure720
$\Delta$ Erwärmung in [K]	0.090	0.090	0.074	0.038	0.074

### 3.3.4.2. Bewertung der Ergebnisse

Aufgrund der gleichen Dichte und Wärmekapazität ergibt sich für PEEK-HPV und PVC die gleiche berechnete Erwärmung, bei FullCure720 und PE unterscheiden sich die Erwärmungen ebenfalls nur minimal voneinander. Die sehr geringe Temperaturzunahme bei Kupfer lässt sich auf die hohe Dichte zurückführen. Während bei den anderen Absorbern das Verhältnis von Dichte zu spezifischer Wärmekapazität zwischen 0.5 und 1.45 liegt, liegt es für Kupfer bei 23. Es ist also deutlich mehr Energie nötig, um ein bestimmtes Volumen Kupfer um die gleiche Temperatur zu erwärmen wie das gleiche Volumen eines der oben genannten Kunststoffe.

Diese Berechnungen stellen jedoch nur eine grobe Näherung dar, da viele Faktoren, wie beispielsweise Unterschiede in den nicht bekannten Absorptionseigenschaften, nicht berücksichtigt werden konnten.

### 3.3.5. Einfluss der Schichtdicke verschiedener Absorber auf die Wärmeverteilung

Erste Simulationen (nicht gezeigt) haben darauf hingedeutet, dass eine Verwendung von 1 mm und 0.5 mm starken PVC-Absorbern in den Experimenten in nahezu keiner Temperaturerhöhung des Fluids während der Expositionszeit resultiert. Die gesamte gemessene Ausdehnung der Membran würde somit aus der Ausdehnung des Absorbers und der „Fokussierung“ der Ausdehnung durch das Fluid auf die Membran resultieren. Daher wurden, wenn möglich, dünnere Absorber aus verschiedenen Materialien gebaut um einen Beitrag der thermischen Ausdehnung des Fluids auf die Membranauslenkung zeigen zu können. Für alle Absorber wurden Simulationen durchgeführt, die die Wärmeverteilung im Fluid zeigen. Aus diesen Ergebnissen wurde die maximale mögliche Gesamtausdehnung des Absorbers und des Fluids berechnet. Die genutzten Methoden für die Messungen der Membranauslenkung sind in den Abschnitten 2.2.2.1 und 2.2.2.2 beschrieben. Eine genaue Beschreibung der

Simulationen ist in Abschnitt 2.2.2.8 zu finden. Die in den Simulationen genutzten Materialwerte entsprechen, wenn nicht anders angegeben, denen in Tabelle 2.6.

### 3.3.5.1. PVC

Da es nicht möglich war die gewünschten Schichtdicken aus schwarzem Hart-PVC fertigen zu lassen, wurden transparente Folien des gleichen PVC-Typs verwendet. Der Aufbau der Absorber aus PVC-Folie ist in Abschnitt 2.2.1.3 erläutert. Die in der Simulation genutzten Schichtdicken entsprechen wie im experimentellen Versuch  $0.4\text{ mm}$ ,  $0.2\text{ mm}$  und  $0.12\text{ mm}$ .

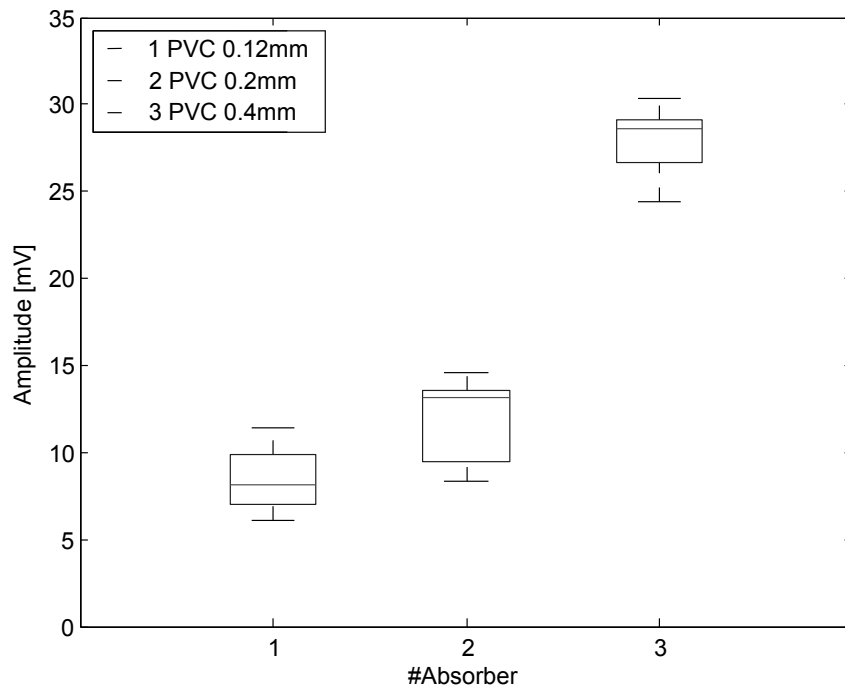
#### 3.3.5.1.1. Ergebnisse

Die Ergebnisse für den experimentellen Versuch sind in Abbildung 3.15 gezeigt. Hier zeigt sich, dass der Absorber mit der größten Schichtdicke ( $0.4\text{ mm}$ ) auch die stärkste Sensorantwort zeigt, gefolgt von dem zweitdicksten und dem dünnsten Absorber. Dies entspricht dem bereits durch Versuch 3.3.1 gezeigten Trend, bei dem bei dicken PVC-Absorbern die Stärke der Sensorantwort deutlich größer war.

Werden zusätzlich die Ergebnisse der in Tabelle 3.7 dargestellten Simulation betrachtet zeigt sich deutlich, dass bei dem  $0.2\text{ mm}$  und dem  $0.12\text{ mm}$  starken Absorber ein Temperaturanstieg in der Flüssigkeit zu erkennen ist. Beim  $0.12\text{ mm}$  starken Absorber wäre demnach die größte Gesamtausdehnung zu erwarten. Trotzdem scheint die zu erwartende Ausdehnung der Flüssigkeit in der Druckkammer nicht auszureichen, um die Verringerung der Absorberdicke und somit die Verringerung der Gesamtausdehnung des Absorbers auszugleichen.

#### 3.3.5.1.2. Bewertung der Ergebnisse

Dass die erwartete Verbesserung des Sensorsignals bei der Nutzung eines dünneren Absorbers in den entsprechenden Messungen ausbleibt, könnte drei Gründe haben: 1) Es gelangt trotz der Reduktion der Absorberdicke immer noch keine Wärme vom Absorber ins Fluid. 2) Das Wasser hinter dem Absorber wird zwar erwärmt, diese Erwärmung reicht aber nicht aus, um die reduzierte Ausdehnung des dünneren Absorbers auszugleichen, daher fällt die Gesamtausdehnung kleiner aus. 3) Die Membran ist so dünn, dass sie flexibel ist und so weniger Druck auf die eigentliche Auslesemembran ausgeübt werden kann, obwohl der höhere thermische Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit eigentlich ein deutlich besseres Ergebnis zulassen sollte.



**Abbildung 3.15.:** Boxplot der Sensorantworten aus Messungen mit  $0.4\text{ mm}$ ,  $0.2\text{ mm}$  und  $0.12\text{ mm}$  dicken PVC-Absorbern bei einer Chopperfrequenz von  $1\text{ Hz}$ . Als Sensorfüllung wurde Wasser verwendet,  $N = 5$ .

Zumindest Möglichkeit 1) kann aufgrund der Simulationen angezweifelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich beim  $0.12\text{ mm}$  dicken Absorber die Temperatur der Flüssigkeit in der Kammer deutlich erhöhen sollte.

Um Möglichkeit 2) zu klären reicht ein Vergleich der in Tabelle 3.7 berechneten Ausdehnung. In dieser ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Absorberdicke von  $0.4\text{ mm}$  kaum eine Erwärmung der Flüssigkeit zu erwarten ist und die Ausdehnung des Absorbers somit dominant ist.

Anders ist dies bei dem  $0.2\text{ mm}$  dicken Absorber. Hier setzt sich die Gesamtausdehnung fast zu gleichen Teilen aus der Fluid- und der Absorberausdehnung zusammen, diese ist allerdings noch deutlich geringer als die Gesamtausdehnung bei einem  $0.4\text{ mm}$  dicken Absorber. Im Gegensatz dazu ist bei einem  $0.12\text{ mm}$  dicken Absorber die Fluidausdehnung deutlich größer als die Absorberausdehnung und die berechnete Gesamtausdehnung ist größer als bei einem  $0.2\text{ mm}$  starken Absorber. Hier ist es also offensichtlich so, dass die Fluidausdehnung die fehlende Absorberausdehnung mehr als ausgleicht.

**Tabelle 3.7.:** Simulation der Wärmeverteilung im Absorber bei verschiedenen PVC-Schichtdicken, mit Wasser als Füllung.

$D_{Abs}$  Absorberdicke;  $\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des Absorbers;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung Absorber;  $D_g$  Ausdehnung gesamt

$D_{Abs}$ [mm]	0.12	0.2	0.4
$\Delta T_a$ [K]	0.6602	0.6010	0.5181
$\Delta T_f$ [K]	0.0225	0.0116	0.0064
$D_a$ [m]	6.34E-09	9.62E-09	1.66E-08
$D_f$ [m]	2.13E-08	1.09E-08	6.05E-09
$D_g$ [m]	2.76E-08	2.06E-08	2.26E-08

Dass sich dies nicht in den experimentellen Daten zeigt, liegt also vermutlich an Möglichkeit 3), also einer Auslenkung des Absorbers selbst. Leider lässt sich dies nicht experimentell überprüfen ohne das Setup so zu verändern, dass die Messungen nicht mehr möglich sind. So müsste hierfür ein Auslenken des Absorbers selbst gemessen werden. Dies wäre jedoch nicht möglich ohne den Absorber elektrisch leitend zu beschichten und somit seine Absorptionseigenschaften stark zu verändern.

Zudem müsste der kapazitive Wegaufnehmer vor dem Absorber positioniert werden, was eine direkte Bestrahlung des Absorbers verhindern würde. Dennoch erscheint dies eine gute Erklärung für die gefundenen Abweichungen zwischen den Simulationen und den experimentell aufgenommenen Werten für die Absorberdicke von 0.12 mm. Durch eine Auslenkung des dünnen Absorbers kommt es also vermutlich zu einem geringeren Druckaufbau, was in einer geringeren Auslenkung der Membran resultiert als es die Simulation zeigte.

### 3.3.5.2. PEEK-HPV

Da für PEEK-HPV keine Daten zur spezifischen Wärmekapazität vorhanden waren, wurden die Simulationen mit einer für dieses Material geschätzten Wärmekapazität durchgeführt. PEEK selbst hat eine Wärmekapazität von etwa  $1.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  (Krenkel, 2009), die eingebrachten Kohlenstofffasern haben vermutlich eine ähnliche Wärmekapazität wie die im CFRP verarbeiteten ( $0.71 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ , Tabelle 2.6).

Da PEEK-HPV zudem noch Zusätze von Grafit und PTFE (Teflon) beigegeben sind, erschien es sinnvoll die Simulationen mit einer Wärmekapazität von  $1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  durchzuführen. Die tatsächliche Wärmekapazität wird mit hoher Wahrscheinlichkeit nahe an diesem Wert liegen. Die Absorber mit unterschiedlichen Dicken wurden

abwechselnd gemessen; alle Ergebnisse wurden in einer neuen Messreihe ermittelt, so dass es zu kleinen Abweichungen zu den Ergebnissen in Abschnitt 3.3.1 kam.

### 3.3.5.2.1. Ergebnisse

Ähnlich wie in den in Abschnitt 3.3.5.1 gezeigten Simulationsergebnissen für PVC kommt es auch hier bei dünner werdenden Absorberdicken zu einer deutlichen Aufwärmung des Fluids (siehe Tabelle 3.8). Auch hier befindet sich der Großteil der Wärme im Absorber. Die stärkere Erwärmung des Fluids führt dazu, dass bei allen Absorberdicken die Fluidausdehnung den Großteil der Gesamtausdehnung  $D_g$  erzeugt. Dies führt dazu, dass bereits der 0.5 mm dicke Absorber eine größere Gesamtausdehnung zeigt als der 1 mm dicke Absorber.

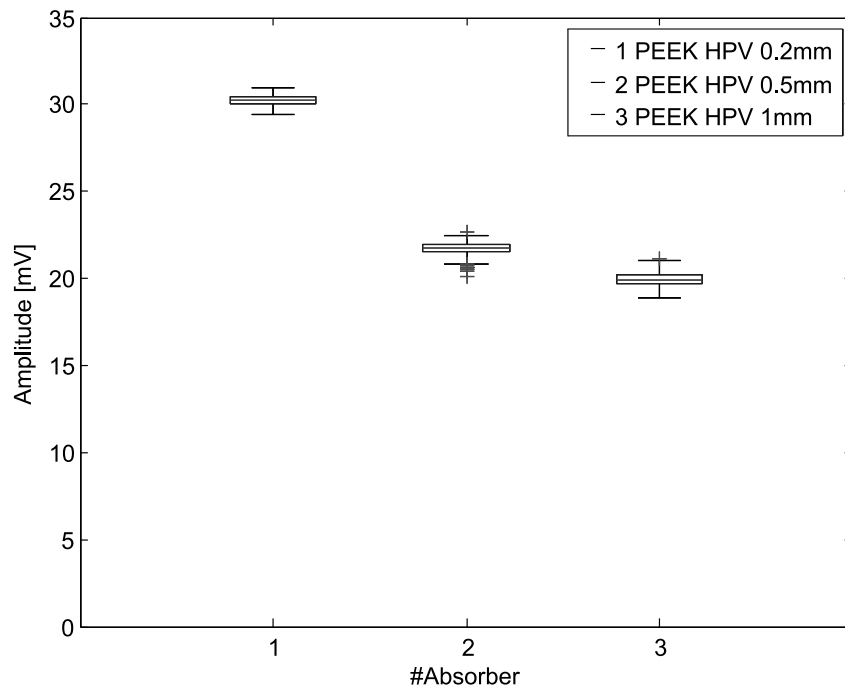
**Tabelle 3.8.:** Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus PEEK-HPV und Berechnungen zur thermischen Ausdehnung des Absorbers und des Wassers:

$D_{Abs}$  Absorberdicke;  $\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des Absorbers;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung Absorber;  $D_g$  Ausdehnung gesamt

$D_{Abs}$ [mm]	0.12	0.2	0.5	1
$\Delta T_a$ [K]	0.7970	0.7250	0.5423	0.3547
$\Delta T_f$ [K]	0.0385	0.0219	0.0085	0.0016
$D_a$ [m]	3.35E-10	5.08E-10	9.49E-10	1.24E-09
$D_f$ [m]	3.64E-08	2.07E-08	8.00E-09	1.53E-09
$D_g$ [m]	3.67E-08	2.12E-08	8.95E-09	2.77E-09

Für 1 mm, 0.5 mm und 0.2 mm dicke Absorber lässt sich der Trend, dass  $D_g$  mit abnehmender Absorberdicke steigt, auch experimentell bestätigen (siehe Abbildung 3.16).

Wie durch die Simulationsergebnisse in Tabelle 3.8 beschrieben, nehmen die Sensorantworten mit abnehmender Absorberdicke zu, so dass auch hier der 0.5 mm dicke Absorber eine größere Gesamtausdehnung zeigt als der 1 mm dicke Absorber. Die Zunahme der Sensorantwort ist bei dem 0.2 mm dicken Absorber im Vergleich zu dem 0.5 mm dicken Absorber deutlich größer als die Zunahme der Sensorantwort eines 0.5 mm dicken Absorbers im Vergleich zu einem 1 mm dicken Absorber.



**Abbildung 3.16.:** Boxplot der Sensorantworten bei 1 mm, 0.5 mm und 0.2 mm dicken PEEK-HPV-Absorbern mit Wasserfüllung bei einer Chopperfrequenz von 1 Hz.  $N = 5$

### 3.3.5.2.2. Bewertung der Ergebnisse

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 vermutet zeigt sich bei PEEK-HPV deutlich ein Einfluss einer Ausdehnung des Fluids in der Druckkammer. Dies bestätigt sich nicht nur durch die Simulationen sondern auch durch die Zunahme der Sensorantwort bei einem dünner werdenden Absorber.

Trotz der geschätzten Wärmekapazität bilden die simulierten Werte die experimentellen Werte sehr gut ab. Ob dies auch für die simulierte Absorberdicke von 0.12 mm zutrifft, lässt sich aufgrund des Fehlens eines entsprechenden Absorbers nicht experimentell bestätigen.

Wegen der Sprödigkeit des Materials und des relativ großen Durchmessers des Absorbers von 15 mm war es nicht möglich einen entsprechenden Absorber herzustellen.



### 3.3.5.3. Kupfer

Die Simulationen wurden auch mit Kupfer durchgeführt. Die genutzten Materialdaten finden sich in Tabelle 2.6, die Beschreibung des simulierten Modells findet sich in Abschnitt 2.2.2.8. Alle experimentellen Daten wurden in einer neuen Messreihe aufgenommen; aus diesem Grund kam es zu kleinen Abweichungen von den in Abbildung 3.12 gezeigten Messwerten.

#### 3.3.5.3.1. Ergebnisse

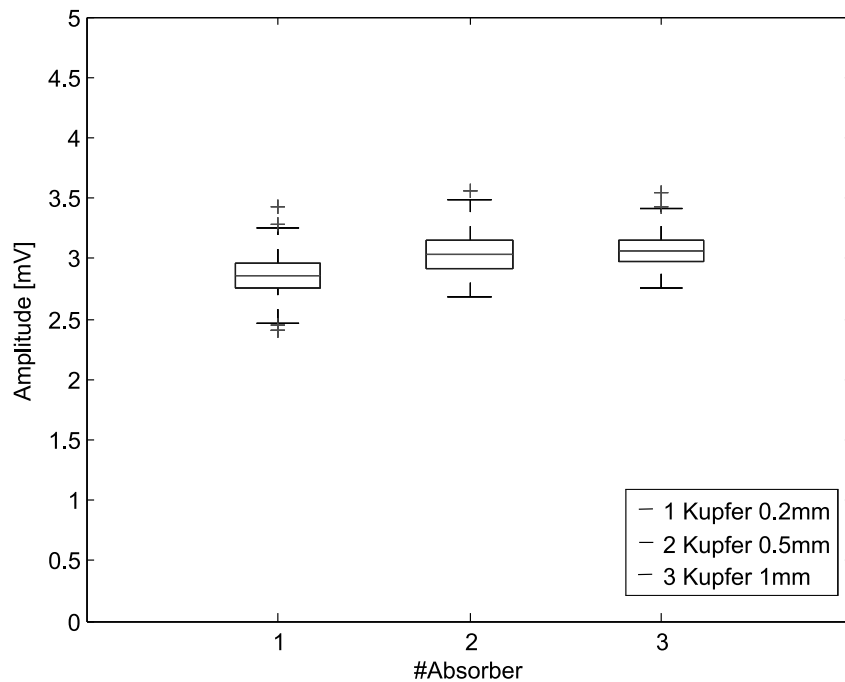
Eine Betrachtung von Abbildung 3.17 für die experimentell aufgenommenen Daten mit Kupfer als Absorber zeigt, dass das Sensorsignal mit abnehmender Schichtdicke geringfügig schlechter wird. Insgesamt ist das Sensorsignal deutlich schwächer als bei PVC oder PEEK-HPV (Vergleiche Abbildung 3.12 in Abschnitt 3.3.1).

Durch die Neuaufnahme der Messdaten kommt es hier im Rahmen der in Abschnitt 3.2.3.2 gezeigten Varianz für neue Befüllungen zu geringfügigen Abweichungen, von den in Abbildung 3.12 gezeigten Messdaten. Diese Abweichung führt hier zu einer etwas stärkeren Sensorantwort des 1 *mm* dicken Absorbers im Vergleich zu einem 0.5 *mm* dicken Absorber, deren Mediane der Messergebnisse sehr dicht beieinander liegen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Absorberdicken ist jedoch nicht signifikant (Kruskal-Wallis Test  $P=0.077$ ). Die in Abbildung 3.17 deutlich sichtbare kleine Sensorantwort für den 0.2 *mm* dicken Absorber ist jedoch hoch signifikant unterschiedlich von der Sensorantwort des 0.5 *mm* dicken Absorbers (Kruskal-Wallis Test  $P=0$ ).

Werden zudem die Simulationsergebnisse aus Tabelle 3.9 betrachtet, zeigt sich, dass auch dort der 1 *mm* dicke Absorber die stärkste Gesamtausdehnung generiert; erst bei einer Absorberschichtdicke von 0.12 *mm* wird die Gesamtausdehnung durch den stärkeren Anteil der Fluidausdehnung an der Gesamtausdehnung stärker als bei dem 1 *mm* dicken Absorber.

Die Unterschiede in den Sensorantworten, die durch die verschiedenen Absorberdicken hervorgerufen werden, sind auch in der Simulation nicht sehr stark ausgeprägt. Allerdings zeigen die Simulationen einen deutlicheren Unterschied zwischen dem 1 *mm* und dem 0.5 *mm* dicken Absorber als zwischen dem 0.2 *mm* und dem 0.5 *mm* dicken Absorber.

Anders als in den bisherigen Simulationen akkumuliert sich sehr viel Wärme im Absorber, die resultierenden Temperaturen sind erheblich höher als bei den anderen Materialien gleicher Absorberdicke. Hinzu kommt noch ein sehr geringer mittlerer



**Abbildung 3.17.:** Boxplot der Sensorantworten der Messungen mit 1 mm, 0.5 mm und 0.2 mm dicken Kupferabsorbern mit Wasserfüllung bei einer Chopperfrequenz von 1 Hz.  $N = 5$

Temperaturunterschied der Absorberflächen zwischen den verschiedenen Kupferabsorberdicken.

Gemäß den simulierten Daten ist auch die Temperatur des Fluids im Sensor deutlich höher und die Gesamtausdehnung ist größer als bei bisherigen Simulationen.

### 3.3.5.3.2. Bewertung der Ergebnisse

In den Simulationen sind die Unterschiede zwischen dem 1 mm und dem 0.5 mm dicken Absorber deutlicher ausgeprägt als dies in den Messungen der Fall war. Da der geringere Unterschied in den experimentellen Ergebnissen auch bei einer stichprobenartigen Beschichtung der Absorber mit Grafit zu verzeichnen war, können mögliche Effekte, die die Absorptionseigenschaften beeinflusst haben als Ursache ausgeschlossen werden. Wahrscheinlich handelt es sich hier um Abweichungen in den Resultaten der Simulationen, die durch die nicht bekannten Materialdaten entstanden sind.

**Tabelle 3.9.:** Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus Kupfer und Berechnungen zur thermischen Ausdehnung des Absorbers und des Fluids:

$D_{Abs}$  Absorberdicke;  $\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des Absorbers;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung Absorber;  $D_g$  Ausdehnung gesamt

$D_{Abs}$ [mm]	0.12	0.2	0.5	1
$\Delta T_a$ [K]	0.9303	0.9300	0.9287	0.9251
$\Delta T_f$ [K]	0.0622	0.0459	0.0445	0.0440
$D_a$ [m]	1.88E-09	3.12E-09	7.80E-09	1.55E-08
$D_f$ [m]	5.87E-08	4.33E-08	4.20E-08	4.15E-08
$D_g$ [m]	6.06E-08	4.65E-08	4.98E-08	5.71E-08

Dass die Sensorantworten trotz geringer werdenden Schichtdicken kleiner wurden, ist vermutlich durch die große Wärmeleitfähigkeit des Kupfers zu erklären. Die hohe Wärmeleitfähigkeit sorgt dafür, dass sich, anders als bei den Kunststoffabsorbern, die Wärme über den gesamten Absorber ausbreitet (ersichtlich aus graphischer Darstellung der Simulationsergebnisse, nicht gezeigt). Hierdurch erwärmen sich die Seiten des Absorbers und das Gewinde, welches mit der Sensorbasis statt mit Fluid in Kontakt steht. In diesen Bereichen kann die Wärme nicht mehr direkt vom Kupfer auf das Fluid übergehen. Durch die größere Verteilung der Energie über den Absorber kommt es vermutlich insgesamt zu einem geringeren Wärmeeintrag in das Sensorfluid als dies die Simulationen erwarten lassen. Zudem wärmt sich das Kupfer bei einer Bestrahlung mit  $260 \text{ W/m}^2$  insgesamt nur sehr wenig auf, wie die in in Abschnitt 3.3.4 gezeigten Berechnungen erbracht haben.

Auch die Simulationen für die Absorberdicken von  $1 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$  und  $0.2 \text{ mm}$  zeigen, dass ein deutlicher Unterschied in der Fluidtemperatur erst bei einer Schichtdicke von  $0.12 \text{ mm}$  zu erwarten wäre (siehe Tabelle 3.9).

Werden die simulierten Auslenkungen von Kupfer mit denen von PEEK-HPV verglichen, zeigt sich, dass es bei Kupfer zu einem deutlich stärkeren Sensorsignal kommen müsste als bei PEEK-HPV. Die experimentellen Daten zeigen jedoch genau das Gegenteil. Dies liegt an der bereits oben erwähnten geringen Erwärmung des Kupfers durch die IR-Bestrahlung. In den Berechnungen aus Abschnitt 3.3.4 sind Effekte wie die hohe IR-Reflexion des Kupfers noch nicht enthalten. Die Unterschiede sind also wahrscheinlich noch größer als dort angegeben.

Dies zeigt eine deutliche Schwachstelle der Simulationen auf. Die angenommene Temperaturerhöhung von  $1 \text{ K}$  durch die Absorption der IR-Strahlung in allen Absorbern

bildet nicht die tatsächliche Erwärmung der Absorber ab. Für einen qualitativen Vergleich der Schichtdicken spielt es keine Rolle, da die IR-Strahlung im gleichen Material, unabhängig von der Schichtdicke, nach dem Energieerhaltungssatz auch immer den gleichen Betrag Wärme erzeugt. Für einen qualitativen Vergleich zwischen verschiedenen Materialien eignen sich die Simulationen aber offenbar nicht.

### 3.3.5.4. Polyethylen (PE)

Für die Simulationen mit Polyethylen (PE) wurde die gleiche Konfiguration in Comsol wie bei PVC, PEEK-HPV und Kupfer genutzt (siehe Abschnitt 2.2.2.8). Die Simulationen wurden für 1 *mm*, 0.5 *mm*, 0.2 *mm* und 0.12 *mm* dicke Absorber durchgeführt und mit den in Abschnitt 3.3.1 gemessenen Werten für eine Absorberdicke von 1 *mm* und 0.5 *mm* verglichen.

#### 3.3.5.4.1. Ergebnisse

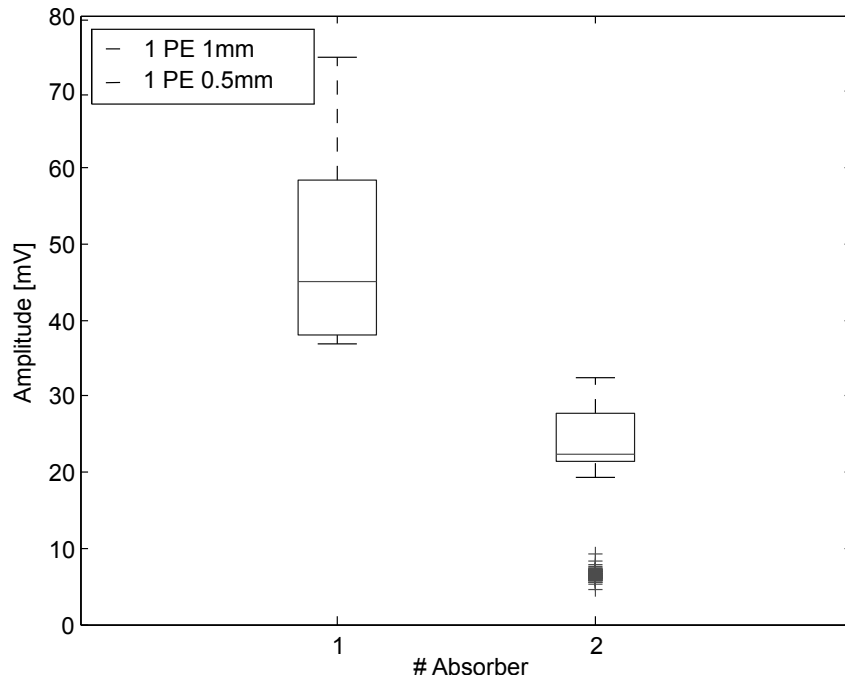
Abbildung 3.18 zeigt die bekannte deutlich stärkere Sensorantwort bei einer Absorberdicke von 1 *mm* im Vergleich zu 0.5 *mm*. Der gleiche Effekt tritt auch in den in Tabelle 3.10 gezeigten Simulationsdaten für alle Schichtdicken auf. Eine Erhöhung der Gesamtausdehnung ist auch bei einer Reduzierung der Absorberdicke auf 0.12 *mm* nicht zu erreichen. Die große Gesamtausdehnung und der stark ausgeprägte Unterschied zwischen dem 1 *mm* und dem 0.5 *mm* dicken Absorber lassen sich auch in Abbildung 3.18 wiederfinden.

Auch in dieser Simulation zeigt sich wieder eine starke Konzentration der Wärme im Absorber. Das Wasser in der Sensorkammer erwärmt sich durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des PE jedoch ebenfalls relativ stark.

#### 3.3.5.4.2. Bewertung der Ergebnisse

Die starke Erwärmung des Absorbers erklärt sich durch die geringe Dichte und dadurch bedingte geringe Masse des Absorbers. Die Erwärmung eines Stoffes berechnet sich mithilfe der eingetragenen Energie, dividiert durch die Masse, multipliziert mit der Wärmekapazität:  $\Delta T = Q/m \cdot c_p$ . Durch die geringe Dichte vom PE hat der Absorber also eine geringere Masse die den negativen Einfluss der großen Wärmekapazität des PE auf die Erwärmung reduziert (siehe Abschnitt 3.3.4).

Die recht starke Erwärmung führt, zusammen mit dem sehr großen thermischen



**Abbildung 3.18.:** Boxplot der Sensorantworten bei 1 *mm* und 0.5 *mm* starken PE-Absorbern mit Wasserfüllung,  $N = 9$

Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha = 2E^{-3} \text{ m/K}$ ), zu einer entsprechend großen thermischen Ausdehnung des Absorbers und somit zu der großen Gesamtausdehnung bei hohen Absorberdicken. Die starke Erwärmung des Fluids ist auf die, für einen Kunststoff ohne weitere Zusätze, hohe Wärmeleitfähigkeit von  $0.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  zurückzuführen. Auch wenn es hier vermutlich zu einem Einfluss des Fluids in der Druckkammer auf die Gesamtausdehnung kommt, ist diese in den experimentellen Daten nicht eindeutig zu erkennen. Dies liegt daran, dass die Fluidausdehnung den durch eine Reduktion der Schichtdicke entstandenen Verlust der großen thermischen Ausdehnung des Absorbermaterials nicht kompensieren kann, so dass die Gesamtausdehnung mit abnehmender Absorberdicke ebenfalls abnimmt.

### 3.3.5.5. FullCure720

Um Messungen auch mit einem 0.12 *mm* dicken Absorber machen zu können, ohne dabei eine Auslenkung des Absorbers selbst befürchten zu müssen (vgl. Abschnitt 3.3.5.1), wurden die Absorber verstärkt. Vorversuche (nicht gezeigt) hatten bereits

**Tabelle 3.10.:** Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus PE und Berechnungen zur thermischen Ausdehnung des Absorbers und des Fluids:

$D_{Abs}$  Absorberdicke;  $\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des Absorbers;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung Absorber;  $D_g$  Ausdehnung gesamt

$D_{Abs}$ [ $\mu m$ ]	0.12	0.2	0.5	1
$\Delta T_a$ [K]	0.7399	0.6752	0.5774	0.5279
$\Delta T_f$ [K]	0.0334	0.0187	0.0095	0.0052
$D_a$ [m]	1.78E-08	2.70E-07	5.77E-07	1.06E-06
$D_f$ [m]	3.15E-08	1.76E-08	8.95E-09	4.96E-09
$D_g$ [m]	4.93E-08	2.88E-07	5.86E-07	1.06E-06

gezeigt, dass auch bei FullCure720 mit den 0.12 mm dicken Absorbern ohne Verstärkung im Vergleich zu den dickeren Absorbern nur kleine Sensorantworten zu erreichen waren. Auch bei FullCure720 ist die Wärmekapazität unbekannt. Da FullCure720 aber ein acrylbasierter Kunststoff ist, wird die spezifische Wärmekapazität vermutlich auch im Bereich anderer acrylbasierter Kunststoffe liegen. Da die Bandbreite hier aber recht groß ist, wurden Simulationen sowohl mit einer spezifischen Wärmekapazität von  $c_p = 1 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ , als auch einer spezifischen Wärmekapazität von  $c_p = 1.5 \text{ J/g} \cdot \text{K}$  durchgeführt.

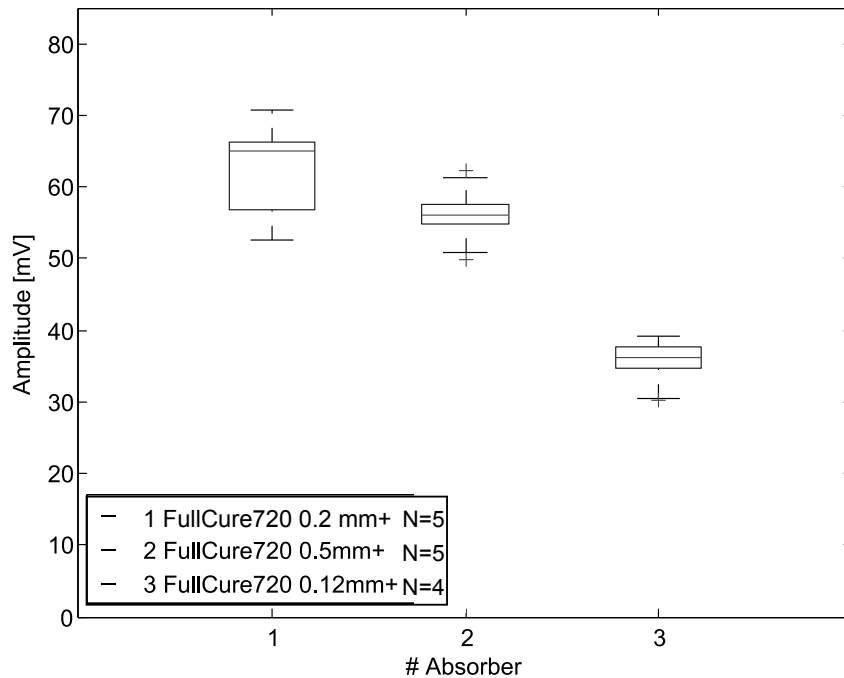
Eine genaue Beschreibung der Veränderung der Absorber und der Auswahl der Wärmekapazitäten ist in Abschnitt 2.2.1.3 beschrieben. Die Geometrie des simulierten Absorbers wurde nicht an die durch die Absorberverstärkung veränderten Verhältnisse angepasst und ist somit die gleiche wie in den vorherigen Simulationen.

### 3.3.5.5.1. Ergebnisse

Die neu aufgenommenen experimentellen Daten, die in Abbildung 3.19 dargestellt sind, zeigen deutliche Abweichungen von den in Abschnitt 3.3.1 aufgenommenen Daten. So sind die Antwortamplituden der Absorber mit 1 mm und 0.5 mm Dicke erheblich größer als in den vorherigen Messungen (siehe Abschnitt 3.3.1). Zudem zeigt sich ein geringerer Unterschied zwischen dem 1 mm und 0.5 mm dicken Absorber. Die beiden Absorber unterscheiden sich nur noch um 14% statt um 20% wie bei den früheren Messungen.

Für den 0.12 mm dicken Absorber gibt es keinen Vergleich zum unverstärkten

Absorber, allerdings fällt auf, dass die Sensorantwort insgesamt deutlich geringer ist als beim 0.5 mm und 1 mm dicken Absorber.



**Abbildung 3.19.:** Boxplot der Sensorantworten von FullCure720-Absorbern unterschiedlicher Dicke mit und ohne Verstärkung. Der Sensor war mit Wasser befüllt und die IR-Strahlung wurde mit 1 Hz moduliert. Das „+“ in der Abbildungslegende zeigt eine Verstärkung des Sensors an.

Die simulierten Werte in Tabelle 3.11 zeigen deutliche Unterschiede, die durch das Einsetzen der beiden unterschiedlichen Wärmekapazitäten entstanden sind. Die Wärme im Absorber und im Fluid sind bei  $c_p = 1 \text{ kJ/g} \cdot \text{K}$  etwas größer, ebenso wie die Unterschiede in der Ausdehnung zwischen den verschiedenen Absorberdicken. Bei den 1 mm dicken Absorbern gibt es nahezu keine Erwärmung des Fluids, auch bei einer Schichtdicke von 0.5 mm ist die Erwärmung des Fluids mit  $0.0015 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $c_p = 1$ ) bzw.  $0.0009 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $c_p = 1.5$ ) nur minimal. Die Unterschiede der Gesamtausdehnungen zwischen dem 0.5 mm und 1 mm dicken Absorber sind mit Werten von knapp 3 nm ( $c_p = 1$ ) und nur 0.7 nm ( $c_p = 1.5$ ) sehr klein. Bei Verwendung beider Wärmekapazitäten in den Simulationen sinkt die Gesamtausdehnung zunächst mit einer abnehmenden Absorberdicke bis zu einer Schichtdicke von 0.2 mm, bei 0.12 mm steigt die Gesamtausdehnung wieder.

**Tabelle 3.11.:** Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines Absorbers aus FullCure720 und Berechnungen zur thermischen Ausdehnung des Absorbers und des Fluids für zwei verschiedene Wärmekapazitäten:  
 $D_{Abs}$  Absorberdicke;  $\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des Absorbers;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung Absorber;  $D_g$  Ausdehnung total

FullCure720	$D_{Abs}$ [ $\mu m$ ]	0.12	0.2	0.5	1
$c_p = 1$	$\Delta T_a [K]$	0.6405	0.5619	0.3829	0.2125
	$\Delta T_f [K]$	0.0188	0.0084	0.0015	0.0001
	$D_a [m]$	1.48E-08	2.17E-08	3.69E-08	4.10E-08
	$D_f [m]$	1.78E-08	7.94E-09	1.38E-09	5.26E-11
	$D_g [m]$	3.26E-08	2.96E-08	3.83E-08	4.11E-08
FullCure720	$D_{Abs}$ [ $\mu m$ ]	0.12	0.2	0.5	1
$c_p = 1.5$	$\Delta T_a [K]$	0.6317	0.5429	0.3318	0.1737
	$\Delta T_f [K]$	0.0180	0.0075	0.0009	0.0000
	$D_a [m]$	1.46E-08	2.10E-08	3.20E-08	3.35E-08
	$D_f [m]$	1.70E-08	7.10E-09	8.04E-10	1.23E-11
	$D_g [m]$	3.16E-08	2.81E-08	3.28E-08	3.35E-08

### 3.3.5.5.2. Bewertung der Ergebnisse

Die deutlich größeren Sensorantworten bei den neu durchgeführten Messungen der 1 mm und 0.5 mm dicken Absorber lassen sich vermutlich durch das Einsetzen einer neuen Membran erklären, auch wenn die Unterschiede hierfür recht hoch erscheinen. Eine Vergleichsmessung (nicht gezeigt) mit einem alten unverstärkten 0.5 mm dicken FullCure720-Absorber zeigte ebenfalls eine größere Sensorantwort (+26%) als in den vorherigen Messungen in Abschnitt 3.12. Für die Vergleichbarkeit innerhalb dieser Versuchsreihe hat dies jedoch keine negativen Auswirkungen, da alle Messungen unter den gleichen Bedingungen aufgenommen wurden.

Die auffällig kleinen Unterschiede zwischen den Absorberdicken von 0.5 mm und 1 mm in Abbildung 3.19 zeigen sich auch in den Simulationen und sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass beim 1 mm Absorber kaum Wärme ins Fluid abgegeben wird. Bei einer halbierten Absorberdicke (0.5 mm Absorber)



kommt es zu einer fast doppelt so starken Erwärmung des Absorbers, welche die geringe Ausdehnung des in seiner Dicke reduzierten Absorbers ausgleicht. Da die zusätzliche Verstärkung der Absorber nicht in die Simulation mit eingeflossen ist, kommt es hier zu Abweichungen zwischen den experimentellen und den simulierten Daten.

Die Simulationen zeigen für beide spezifische Wärmekapazitäten, dass bei  $0.12\text{ mm}$  Absorberdicke die Fluidausdehnung die des Absorbers überwiegt, allerdings nur um einen sehr kleinen Betrag. Diese Zunahme reicht jedoch bei beiden simulierten Konfigurationen aus um eine höhere Gesamtausdehnung zu erreichen als dies bei dem  $0.2\text{ mm}$  dicken Absorber der Fall war.

Die im Experiment aufgenommenen Daten zeigen diese deutliche Verbesserung der Sensorantwort mit dem  $0.12\text{ mm}$  dicken Absorber jedoch trotz der Verstärkung der Absorber nicht. Da eine Absorberauslenkung nach außen, die den Druck auf die Auslesemembran reduzieren würde, aufgrund der Verstärkung der Absorberstruktur unwahrscheinlich ist, könnte dies an einem negativen thermischen Einfluss der Verstärkung auf die Messergebnisse liegen. Durch die Gewichtszunahme der Absorber steigt die thermische Masse, wodurch wahrscheinlich weniger Wärme an das Fluid abgegeben werden kann. Aufgrund des fehlenden Materialwerts für die spezifische Wärmekapazität ist es aber auch möglich, dass die Simulation aufgrund einer angenommenen falschen Wärmekapazität die Messergebnisse nicht korrekt abbildet.

### 3.3.5.6. IR-transmissives Fenster

Für die Simulationen des IR-transmissiven Fensters wurde das Comsol-Modell gemäß den Angaben in Abschnitt 2.2.2.8.1 angepasst.

In einer Konfiguration wurde der Sensor ohne Änderungen der in Abschnitt 3.3.1 genutzten Konfiguration genutzt, in der das IR-transmissive Fenster auf die Sensorbasis geschraubt und Wasser als Sensorfüllung genutzt wurde.

In einer zweiten Konfiguration wurde das Fenster von außen mit Grafit beschichtet, als Sensorfüllung diente auch hier Wasser.

Ein direkter Vergleich zwischen berechneten Gesamtausdehnungen der beiden Konfigurationen kann nicht vorgenommen werden, da sie sich bei einer Bestrahlung mit IR-Strahlung durch die unterschiedlichen absorbierenden Materialien verschieden stark erwärmen. Es können jedoch die Ausdehnungen der unterschiedlichen Schichtdicken je Konfiguration sowie prozentuale Vergleiche angestellt werden.

### 3.3.5.6.1. Ergebnisse

Die simulierten Daten zeigen, dass bei Nutzung eines unbeschichteten Fensters eine Reduzierung der Fensterdicke kaum einen Einfluss auf die simulierte Gesamtausdehnung hat (siehe Tabelle 3.12). Dies liegt besonders an der sich kaum verändernden Fluid Erwärmung, die über alle Fensterdicken sehr ähnlich bleibt. Die Absorber erwärmen sich entsprechend ihrer Dicke zwar sehr unterschiedlich, so erwärmt sich der 0.2 mm dicke Absorber fast doppelt so stark wie der 1 mm Absorber. Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Fenstermaterials ist allerdings so klein, dass die Ausdehnung des Fensters je nach seiner Dicke ein bis zwei Größenordnungen unter der des Fluids liegt und somit kaum einen Einfluss auf die Gesamtausdehnung hat.

**Tabelle 3.12.:** Ergebnisse der Simulation zur Wärmeverteilung in der Fluidkammer bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters aus Herasil und Berechnungen zur thermischen Ausdehnung des Absorbers und des Fluids bei Applikation der Wärme an der Innenseite des Fensters und außerhalb des Fensters an einer aufgetragenen 100µm Grafitsschicht:

$\Delta T_f$  Temperaturänderung des Fluids;  $\Delta T_a$  Temperaturänderung des IR-Fensters;  $\Delta T_{grafit}$  Temperaturänderung des Grafits;  $D_f$  Ausdehnung Fluid;  $D_a$  Ausdehnung IR-Fenster;  $D_{grafit}$  Ausdehnung Grafit;  $D_g$  Ausdehnung gesamt

$D_{Abs}$ [mm]	0.2		0.5		1	
Absorber:	Wasser	Grafit	Wasser	Grafit	Wasser	Grafit
$\Delta T_{grafit}$ [K]		0.9300		0.9299		0.9300
$\Delta T_a$ [K]	0.9089	0.8126	0.7572	0.6518	0.4528	0.4555
$\Delta T_f$ [K]	0.0432	0.0307	0.0421	0.0134	0.0421	0.0037
$D_{grafit}$ [m]		1.77E-10		1.77E-10		1.77E-10
$D_a$ [m]	9.09E-11	8.13E-11	1.89E-10	1.63E-10	2.26E-10	2.28E-10
$D_f$ [m]	4.08E-08	2.90E-08	3.97E-08	1.27E-08	3.97E-08	3.51E-09
$D_g$ [m]	4.09E-08	2.93E-08	3.99E-08	1.27E-08	4.00E-08	3.92E-09

Die simulierte Gesamtausdehnung in der Konfiguration mit Grafit wird mit abnehmender Fensterdicke im Gegensatz zur simulierten Gesamtausdehnung ohne Beschichtung deutlich größer. Allerdings bleibt die Gesamtausdehnung über alle Schichtdicken deutlich unter der der Simulationskonfiguration ohne Beschichtung. Während die Erwärmung des Grafits in allen Simulationskonfigurationen nahezu konstant bleibt, resultiert eine abnehmende Schichtdicke des Fensters in einer deutlich höheren Fenstertemperatur. Auch hier hat die Fensterausdehnung aufgrund des sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Fenstermaterials allerdings

kaum Einfluss auf die Gesamtausdehnung. Mit abnehmender Fensterdicke nimmt jedoch auch die Temperatur des Fluids in der Druckkammer deutlich zu, was dazu führt, dass die Gesamtausdehnung mit abnehmender Fensterdicke zunimmt.

### 3.3.5.6.2. Bewertung der Ergebnisse

Die in Abschnitt 3.3.2.2 experimentell gezeigte Vergrößerung des Sensorsignals bei einer Beschichtung des Fensters mit Grafit ließ sich in den Ergebnissen der Simulation für ein 1 mm dickes IR-transmissives Fenster aus Herasil nicht nachvollziehen (siehe Tabelle 3.12).

Ein Grund hierfür ist vermutlich eine unterschiedlich starke Wärmeentwicklung am Grafit und im Wasser, die keinen Eingang in die Simulationen gefunden hat (vgl. Abschnitt 3.3.5.3): Während die Wärmekapazität von Grafit fast sechsmal kleiner ist als von Wasser, hat es eine fast doppelt so hohe Dichte. Das Grafit erwärmt sich (Berechnet mit  $\Delta T = Q/m \cdot c_p$ , Materialwerte siehe Tabelle 2.6) wahrscheinlich etwa dreimal stärker als das Wasser.

Im Gegensatz dazu ist die Reflexion von Grafit etwas größer als die von Wasser. Während Grafit eine 7%ige (Baldrige et al., 2009) - 20%ige (Mellouki et al., 2007) Reflexion in der für diesen Versuch interessanten Bandbreite um 3.7  $\mu m$  zeigt, hat Wasser lediglich eine Reflexion von 4% bei etwa 3.5  $\mu m$ , bei 4  $\mu m$  etwa 2.3% und bei 3  $\mu m$  sogar nur 0.5% (Baldrige et al., 2009). Zudem muss beachtet werden, dass die Materialwerte, die für Grafit in der Simulation gewählt wurden aufgrund fehlender Originalwerte des Herstellers aus anderen Quellen hinzugezogen werden mussten, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse geführt haben kann.

In Anbetracht der nicht in die Simulation eingegangenen Reflexionseigenschaften und der angenommenen gleichen Wärmeentwicklung in Grafit und Wasser lassen sich die Simulationen der beiden Konfigurationen nicht direkt miteinander vergleichen. Anhand der diskutierten Punkte lässt sich jedoch das Ergebnis in Abschnitt 3.3.2.2 besser nachvollziehen. Durch die deutlich stärkere Erwärmung des Grafits kommt es vermutlich zu einer stärkeren Erwärmung des Fensters, das die Wärme an das Fluid weitergibt.

Anders als bei einer direkten Erwärmung durch eine Absorption der Strahlung im Wasser kommt es durch die Beschichtung vermutlich zu einem geringeren Wärmeaustrag aus dem System und somit zu einer stärkeren Erwärmung des Fluids und einer daraus resultierenden stärkeren Ausdehnung der Membran.

Experimentelle Untersuchungen mit dünnerem Fenstermaterial konnten leider nicht durchgeführt werden, da dieses nicht zu Verfügung stand.

### 3.3.6. Einfluss von verschiedenen Materialparametern auf die Wärmeverteilung im Absorber anhand von PEEK-HPV, Simulation

Da mit PEEK-HPV-Absorbern sowohl in der experimentellen Datenaufnahme als auch den Simulationen gezeigt werden konnte, dass eine Nutzung von dünneren Absorberschichtdicken in höheren Sensorantworten resultiert, wird PEEK-HPV als Modellmaterial für die Untersuchung von verschiedenen Materialparametern genutzt. Anhand von Simulationen wurde der Einfluss der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\kappa$  und der Dichte untersucht. Zudem wurden weitere Simulationen der Absorberschichtdicke durchgeführt um deren Einfluss auf die Gesamtausdehnung weiter zu untersuchen.

Für die Simulationen wurden die Absorberschichtdicke sowie die spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Dichte des PEEK-HPV schrittweise verändert und die simulierte Gesamtausdehnungen miteinander verglichen.

Für die Parameter wurden Parameterbereiche definiert, die so oder ähnlich auch in anderen in dieser Dissertation verwendeten Absorbermaterialien zu finden sind.

#### 3.3.6.0.3. Ergebnisse

Wie bereits in Abschnitt 3.3.5.2 vermutet zeigt Abbildung 3.20A für abnehmende Absorberschichtdicken im Bereich von  $2.2 - 0.05 \text{ mm}$  eine deutliche Zunahme der Gesamtausdehnung. Die Kurve verläuft exponentiell, was bedeutet, dass eine Verringerung der Absorberschichtdicke auch zu exponentiell steigenden Sensorsignalen führen könnte. Einen deutlich anderen Kurvenlauf zeigt die Wärmeleitfähigkeit in Abbildung 3.20B. Hier zeigt die Kurve im Parameterbereich von  $0.3 - 1.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  einen Sättigungsverlauf; mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit wird die Zunahme der Gesamtausdehnung immer kleiner.

Für die Dichte in Abbildung 3.20C zeigt sich im Parameterbereich von  $900 - 2000 \text{ kg/m}^3$  ein linearer Verlauf der Gesamtausdehnung, die mit zunehmender Dichte immer geringer wird. Ein ähnliches Bild zeigt auch die spezifische Wärmekapazität in Abbildung 3.20D im Bereich von  $500 - 1600 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . Auch hier zeigt sich ein linearer Kurvenverlauf der Gesamtausdehnung, die mit zunehmender spezifischer Wärmekapazität abnimmt.

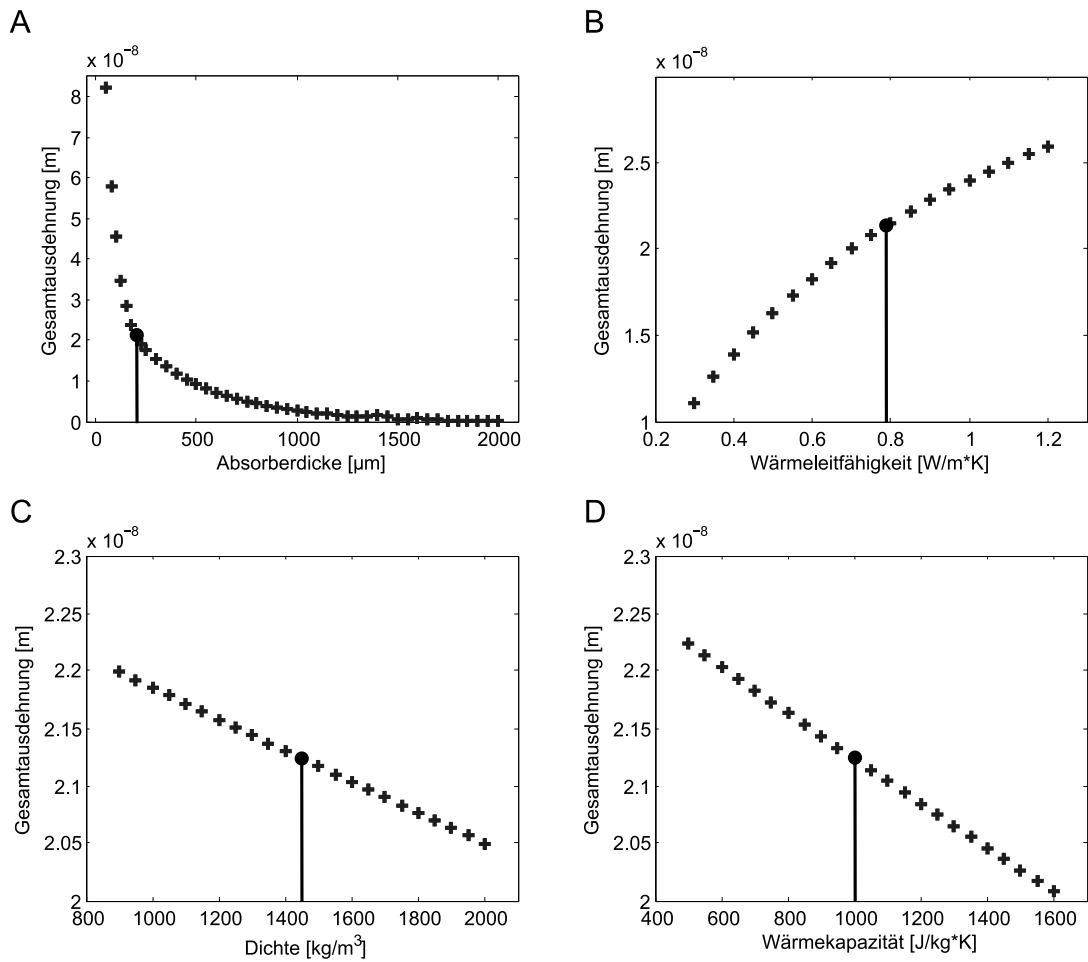
#### 3.3.6.0.4. Bewertung der Ergebnisse

Die exponentielle Zunahme der Sensorantwort bei einer Verringerung der Absorberschichtdicke zeigt, dass dies der Parameter mit dem größten Einfluss

auf die Gesamtausdehnung ist. Zudem ist es auch der einzige der simulierten Parameter, der tatsächlich durch eine Veränderung der Absorber erreichbar ist, ohne ein neues Material finden zu müssen.

Der gleiche Kurvenverlauf von Dichte und spezifischer Wärmekapazität erklärt sich durch den Zusammenhang  $\Delta T = m/(Q \cdot c_p)$ , der die Temperaturzunahme definiert. Da die Geometrie des Absorbers gleich geblieben ist, ist die Dichte direkt proportional zur Masse  $m$ , die wiederum in einem direkten Verhältnis zur spezifischen Wärmekapazität steht.

Der Sättigungsverlauf der Wärmeleitfähigkeit kommt möglicherweise durch homogenere Verteilung der Wärme im Absorber zustande, was zu einer geringeren Wärmeabgabe ans Fluid führt.



**Abbildung 3.20.:** Simulation der Gesamtausdehnung in Abhängigkeit von der Absorberdicke, der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität von PEEK-HPV. Der große Punkt markiert den jeweiligen realen Parameterwert des PEEK-HPV

### 3.3.7. Fazit aus den Experimenten mit verschiedenen Absorbern

Die aufgenommenen experimentellen und simulierten Daten geben einen recht umfassenden Eindruck über den Einfluss der Absorber auf die Sensorantwort bei einer IR-Exposition und sollen anhand der in Tabelle 3.13 genannten Kriterien diskutiert werden. Die CFRP-Absorber können nur aufgrund der in Abbildung 3.12 dargestellten Ergebnisse diskutiert werden da diese Absorber danach nicht mehr nutzbar waren.

**Tabelle 3.13.:** Kriterienkatalog zur Auswahl eines geeigneten Absorbers, Stabilität: Mechanische Stabilität des Absorbers, Empfindlichkeit: Empfindlichkeit des Sensors, Reproduzierbarkeit: Reproduzierbarkeit der Messergebnisse,  $NEP''$ : Noise-Equivalent-Power, Fluid messbar: Einfluss des Fluids messbar, Beschichtung: Verbesserung der Antwortamplitude durch Grafitbeschichtung. ++  $\hat{=}$  sehr gut, +  $\hat{=}$  gut, o  $\hat{=}$  ausreichend, -  $\hat{=}$  schlecht, --  $\hat{=}$  sehr schlecht.

	PVC	PE	CFRP	Kupfer	Full-Cure720	PEEK-HPV	IR-trans. Fenster
Stabilität	+	+	-	++	+	+	+
Empfindlichkeit	+	++	o	-	++	o	o
Reproduzierbarkeit	+	-		+	o	+	+
$NEP''$	+	++	o	--	o	+	-
Fluid messbar	-	-		+	-	+	++
Beschichtung	-	-		++	-	-	+

Bezüglich der **Stabilität** haben sich besonders bei dünnen Schichtdicken Probleme gezeigt. Während CFRP-Absorber aufgrund der Sprödigkeit des die Fasern umgebenden Matrixmaterials schnell nicht mehr zu nutzen waren und schon bei Schichtdicken von 0.5 mm zerbrachen, zeigten sich bei den anderen Kunststoffen, besonders bei dünnen Schichten wie etwa 0.12 mm, Probleme aufgrund der Elastizität der Materialien. Sehr weiche und elastische dünne Absorber, wie die aus PVC (siehe Abschnitt 3.3.5.1) oder FullCure720 (siehe Abschnitt 3.3.5.5), lenken sich höchstwahrscheinlich bei Druck in der Druckkammer selbst aus und reduzieren so Druck auf die Auslesemembran, was zu geringeren Sensorantworten führt.

Um die Stabilität insgesamt zu erhöhen und um den genannten Effekt der unerwünschten Auslenkung der Absorber zu minimieren, würde eine Verringerung des Absorberdurchmessers in Frage kommen.

Da die Stärke der Sensorantwort auf den IR-Reiz ein wichtiges Kriterium für die Bewertung eines IR-Sensors ist, soll diese hier ausführlicher diskutiert werden. Da

sich die getesteten Sensorkonfigurationen nicht in der Größe der absorbierenden Fläche unterscheiden und alle in gleicher Weise der IR-Strahlung exponiert waren, ist die Stärke der Sensorantwort, also die Größe der Antwortamplitude, auf eine IR-Exposition direkt proportional zur **Empfindlichkeit**  $\mathfrak{R}$  des Sensors und zwischen allen getesteten Absorbern direkt vergleichbar.

Die berechneten Empfindlichkeiten der einzelnen Sensorkonfigurationen auf Basis der in Abbildung 3.12 dargestellten Daten sind in Tabelle 3.14 zu finden und zeigen, dass die Absorber mit dem größten thermischen Ausdehnungskoeffizienten die größten Empfindlichkeiten aufwiesen. Tabelle 3.14 zeigt aber auch, dass die **Noise-Equivalent-Power** ( $NEP''$ ) nicht alleine von der Größe der Sensorantwort, beziehungsweise der Empfindlichkeit abhängig ist, sondern auch von der Rauschspannung  $U_r$ . So kommt es, dass Messungen mit einem 0.2 mm dicken PEEK-HPV-Absorber kleinere, also bessere,  $NEP''$ -Werte zeigen als beispielsweise Messungen mit einem 1 mm dicken PVC-Absorber, obwohl dessen Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  höher ist.

**Tabelle 3.14.:** Rauschspannung  $U_r$ , Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  und Noise-Equivalent-Power  $NEP''$  des besten Absorbers für jedes getestete Material.

Absorber	$U_r$ [V]	$\mathfrak{R}$ [V/W]	$NEP''$ [ $W/m^2$ ]
PVC 1 mm	1.92E-04	0.845	1.288
PE 1 mm	2.11E-04	1.269	0.940
CFRP 0.5 mm	1.31E-04	0.195	3.816
PEEK-HPV 0.5 mm	1.34E-04	0.657	1.152
Kupfer 0.5 mm	1.21E-04	0.055	12.415
FullCure720 mm	4.44E-04	1.053	2.388
IR-trans. Fenster	1.75E-04	0.060	16.575

Während Simulationen und neue Messungen mit einem dünneren Absorber in Abschnitt 3.3.5.2 zeigen, dass es sich bei Verwendung von PEEK-HPV höchstwahrscheinlich um einen **Einfluss des Fluids** handelt, der die Sensorantwort bei dünner werdenden Absorberdicken steigen lässt, lässt sich dies für alle anderen Absorbermaterialien in den Experimenten nicht direkt nachvollziehen.

In Abschnitt 3.3.5 wurden für alle Absorber Simulationen durchgeführt, die, wenn überhaupt, erst bei sehr dünnen Absorberdicken eine Verbesserung der Sensorantwort durch einen Einfluss des Fluids vermuten lassen. Lediglich für PE konnte anhand von Simulationen noch eine deutliche Erwärmung des Fluids in der Druckkammer gezeigt werden. Aufgrund des hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des PE lässt sich ein möglicher Einfluss des Fluids bei diesem aber nicht so leicht erkennen wie bei PEEK-HPV.

Weitere Simulationen in Abschnitt 3.3.6 zeigen einen exponentiellen Einfluss der



Absorberdicke auf den Beitrag des Fluids zur Sensorantwort am Beispiel von PEEK-HPV. Die Absorberdicke ist somit eindeutig eine sehr wichtige Stellschraube, anhand derer die Empfindlichkeit des Sensors verbessert werden kann.

Um die **Reproduzierbarkeit** der Messergebnisse zu untersuchen, bietet Abbildung 3.12 eine gute Ausgangsbasis. Hier zeigt sich für die meisten Sensoren eine recht gute Reproduzierbarkeit. Besonders die Absorber mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und einem großen Sensorsignal zeigen jedoch eine hohe prozentuale Varianz im Vergleich zu den anderen Absorbern. Diese ist vermutlich jedoch nur im Falle von FullCure720 unmittelbar auf die Materialeigenschaften zurückzuführen. Bei einer Beschichtung mit Grafit steigt die Varianz der Messergebnisse stark an. Besonders im Fall des IR-transmissiven Fensters und von Kupfer wurde dies beobachtet (siehe Abschnitt 3.3.2.2).

Genau bei diesen beiden Absorbern zeigt eine **Beschichtung** mit Grafit allerdings auch den größten Effekt. Beim Fenster und Kupfer resultierte eine Beschichtung in einer Verbesserung der Sensorantwort von 15% beziehungsweise 30%, während bei allen anderen Absorbern eine Verschlechterung der Sensorantwort von bis zu 15% gemessen wurde.

Da der Einfluss des Fluids auf die Sensorantwort für PEEK-HPV und das IR-transmissive Fenster besonders eindeutig gezeigt werden konnte, wurden diese beiden Absorber für die in Abschnitt 3.4 folgenden Versuche weiterverwendet.

### 3.4. Evaluation von verschiedenen Fluiden

Im folgenden Kapitel soll der Einfluss von verschiedenen Fluiden in der Druckkammer auf die Messergebnisse evaluiert werden. Zunächst wurde hierfür die generelle Eignung von verschiedenen Fluiden für die Messungen überprüft. Anschließend wurden Messungen mit verschiedenen Fluiden mit einem PEEK-HPV-Absorber und mit dem IR-transmissiven Fenster durchgeführt. Zum Vergleich des Sensorkonzepts mit dem einer Golayzelle wurden zudem Messungen mit einem Sensor mit Luftfüllung, IR-transmissivem Fenster und zusätzlichem Absorber in der Druckkammer, also faktisch einer Golayzelle, durchgeführt.

#### 3.4.1. Test auf Eignung als Sensorfluid

In diesen Versuchen wurden die Fluide, die potentiell als Sensorfluid genutzt werden sollten, auf ihre praktische Eignung überprüft. Ziel war es, passive Effekte, wie beispielsweise ein nicht beherrschbares Entweichen des Sensorfluids aus der Druckkammer, aufzuzeigen. Mögliche passive Effekte würden zwangsläufig eine ungleichmäßige

Sensorantwort generieren und damit reproduzierbare Sensorantworten verhindern. Es wurden Novec7100, ein 50%iges Glycerol-Wasser-Gemisch (GWG-50%), destilliertes Wasser, Silikonöl B10 und Luft auf ihre Eignung untersucht. Wenn nicht anders angegeben wurden alle Experimente mit einem Absorber aus 1 *mm* PVC und einer Chopperfrequenz von 1 *Hz* durchgeführt.

Wie in Abschnitt 3.3.5.1 gezeigt wurde ist bei einer Verwendung von PVC-Absorbern keine Fluidausdehnung zu erwarten, sondern das Fluid dient lediglich der „Fokussierung“ der Absorberausdehnung auf die Membran. Da dies bekannt war deutete jede Veränderung der Sensorantwort bei den Messungen mit den unterschiedlichen Fluiden eindeutig auf das Auftreten von passiven Effekten wie beispielsweise einem Entweichen des Fluids oder auch einer Zerstörung des Sensors durch das Fluid hin. Bei Verwendung eines Absorbers, bei dem ein Einfluss der Fluidausdehnung zu erwarten gewesen wäre, hätte es sich bei einer Änderung der Sensorantwort auch um einen direkten Einfluss einer Ausdehnung des Fluids handeln können, was eine Aussage über die Güte des Fluids, nicht aber eine eindeutige Aussage über seine passiven Eigenschaften, zugelassen hätte.

### 3.4.1.1. Test auf Eignung von Novec7100 als Sensorfluid

Der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient (siehe Tabelle 2.6) macht das Fluid zu einem vielversprechenden Kandidaten als Sensorfüllung. Erste Versuche zeigten aber, dass es zu einer stetigen Abnahme der Antwortamplitude kam. Wurde das halbtransparente FullCure720 als Absorber gewählt waren Luftblasen im Sensor zu erkennen, die über die Zeit größer wurden, der Sensor zog also Luft. In Abschnitt 3.2.3.5 konnte bereits gezeigt werden, dass dies einen erheblichen negativen Effekt auf die Sensitivität des Sensor hat. Nach der Auswertung von je fünf Messreihen mit PVC und FullCure720-Absorber (je 1 *mm* Dicke) zeigt sich nach 400 Expositionen eine mittlere Abnahme der Antwortamplitude von 48.39% bei PVC und von 49.25% bei FullCure720. Dies legt den Schluss nahe, dass auch in der Sensorkonfiguration mit einem PVC-Absorber Luft in den Sensor eindrang.

Die Materialeigenschaften des Absorbers scheinen das Eindringverhalten der Luft also erkennbar nicht zu beeinflussen (Signifikanztest auf Unterschiede zwischen den Abweichungen bei beiden Absorbern mit Kruskal-Wallis Test  $P = 0.9168$ , also kein signifikanter Unterschied). Vermutlich kommt es durch die hohe Flüchtigkeit des Novec7100 zu einem entweichen im gasförmigen Zustand, wodurch Luft von außen in das freigewordene Volumen nachziehen kann. Der Sensor scheint also mit Novec-7100-Füllung nicht vollständig dicht zu sein, was einen besonders negativen Effekt bei dieser stark flüchtigen Flüssigkeit hat. Die starke Abnahme der Sensorantwort über die Zeit lässt daher eine Verwendung von Novec7100 in den Versuchen nicht zu.

### 3.4.1.2. Test auf Eignung eines 50% Glycerol-Wasser-Gemisches (GWG-50%) als Sensorfluid

Als weiteres Sensorfluid wurde Glycerol gewählt. Es hat einen etwa doppelt so hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie Wasser, eine sehr kleine Wärmekapazität und eine gute Wärmeleitfähigkeit (siehe Tabelle 2.6 für die genauen Werte). Zudem kommt es als Glycerol-Triester in allen natürlichen Ölen und Fetten vor und könnte somit nah am biologischen Vorbild liegen. Da es sehr dickflüssig ist, wurde es durch die Hinzugabe von Wasser im Verhältnis 1 : 1 verdünnt. Dies führte zwangsläufig zu einer Verringerung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten und einer Zunahme der Wärmekapazität.

Eine Auswertung von fünf Befüllungen mit je 400 Expositionen ergab eine Verringerung der Antwortamplitude um 1.94% oder  $\leq 1.5 \text{ mV}$ . Der Unterschied zwischen der ersten und der letzten Antwortamplitude liegen somit geringfügig über dem Grundrauschen des Systems von circa  $1 \text{ mV}$ . Nimmt man diese Werte allerdings als Grundlage für eine Berechnung der Änderung nach dem Versuchsstandart von 100 Expositionen, reduziert sich die Verringerung des Antwortamplituden auf  $\leq 0.375 \text{ mV}$ . Aufgrund dieser nur geringen Abweichung erscheint ein 50%ige Glycerol-Wasser-Gemisch geeignet für die Versuche.

### 3.4.1.3. Test auf Eignung von destilliertem Wasser als Sensorfluid

Ein Vergleich der jeweils ersten und letzten Antwortamplitude der fünf Befüllungen ergibt eine mittlere Abnahme der Antwortamplitude von 1.27%. Dies entspricht einer Abnahme von  $\leq 1.32 \text{ mV}$  nach 400 Expositionen. Berechnet man daraus die Abnahme der Sensorantwort für den Versuchsstandart von 100 Expositionen, liegt die Abnahme bei  $0.33 \text{ mV}$ . Dies liegt deutlich unter dem Rauschen von circa  $1.3 \text{ mV}$  und ist somit für einen Messzeitraum von 100 Sekunden (1 Exposition pro Sekunde da  $1 \text{ Hz}$ ) vernachlässigbar. Wasser ist also als Sensorfluid geeignet.

### 3.4.1.4. Test auf Eignung von Silikonöl B10 als Sensorfluid

Die Abweichung zwischen der ersten und letzten Antwortamplitude liegt im Durchschnitt bei 8.1%. Dies entspricht einer mittleren Veränderung von etwa  $3.2 \text{ mV}$  bei einem mittleren Rauschen von etwa  $4 \text{ mV}$ . Betrachtet man die Abweichung in Relation zu dem hohen Rauschen während der Messungen, relativiert sich die hohe Abweichung. Eine Abnahme der Antwortamplitude über die Zeit ist anders als bei Novec7100 (siehe Abschnitt 3.4.1.1) nicht eindeutig zu erkennen. Trotz der

durch das Rauschen verursachten hohen Varianz kann Silikonöl also für die Versuche genutzt werden.

### 3.4.1.5. Test auf Eignung von Luft als Sensorfluid

In der Sensorconfiguration mit Luft und dem 1 *mm* starken PVC-Absorber gibt es keine feststellbare Sensorantwort; die Sensorantwort entspricht dem Grundrauschen des Systems. Luft wird dennoch weiter verwendet da auf ihr das Prinzip der Golayzelle beruht. Zudem haben entsprechende Vorversuche bereits gezeigt, dass Luft in Kombination mit einem IR-durchlässigen Fenster messbare Sensorantworten generiert.

### 3.4.1.6. Bewertung der Eignung der getesteten Fluide als Sensorfluid

Die Messungen haben gezeigt, dass der Sensor mit vier der fünf getesteten Fluide eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zeigte und diese Fluide für weitere Versuche genutzt werden konnten.

Mit dem 50%igen Glycerol-Wasser-Gemisch, destilliertem Wasser und Silikonöl B10 zeigt der Sensor über eine Messdauer von 400 Sekunden ein ausreichend stabiles Antwortsignal. Diese Fluide eignen sich also von ihrem passiven Verhalten her gut für die Nutzung als Sensorfluid und sollen in den weiteren Versuchen auf ihren Einfluss auf die Sensorantwort untersucht werden.

Novec7100 und Luft zeigen hingegen ein stark abnehmendes Sensorsignal beziehungsweise überhaupt kein detektierbares Sensorsignal.

Beim Novec7100 kommt es vermutlich aufgrund der hohen Flüchtigkeit des Fluids (Dampfdruck 26.8 *kPa*, siehe Datenblatt (3M Deutschland GmbH, 2014)) zu einem Verdampfen der Flüssigkeit und zu einem Austreten des Dampfes durch das Ventil des Sensors. Hierdurch dringt wiederum Luft in den Sensor ein, die zu einer starken Verringerung des Sensorsignals führt (siehe Abschnitt 3.2.3.5).

Der Test auf eine Eignung von Luft zeigt vermutlich aufgrund der Kompressibilität der Luft kein detektierbares Sensorsignal. Die Kompressibilität führt dazu, dass die Absorberausdehnung, die ansonsten bei den anderen Fluiden gemessen werden konnte, gepuffert wurde. Da Luft aber in Kombination mit einem IR-transmissiven Fenster als Golayzelle (siehe Abschnitt 1.2.2.1.1) genutzt wird, wird Luft weiter verwendet, um mit ihr in den verwendeten Konfigurationen vergleichend messen zu können.

### 3.4.2. Einfluss verschiedener Fluide auf die Sensorantwort

Aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.5, die gezeigt haben, dass bei PEEK-HPV und dem IR-transmissiven Fenster eine Temperaturzunahme des Fluids zu erwarten ist, die auch einen nennenswerten Einfluss auf die Gesamtausdehnung hat, wurden die folgenden Versuche mit diesen beiden Absorbermaterialien durchgeführt.

#### 3.4.2.1. Vergleich der Fluide in einem Sensor mit PEEK-HPV-Absorber

Da in Abschnitt 3.3.5.2 eindeutig ein Einfluss des Fluids für 1 *mm*, 0.5 *mm* und 0.2 *mm* dicke PEEK-HPV-Absorber gezeigt werden konnte, werden die folgenden Versuche ebenfalls mit allen drei Absorberschichtdicken mit verschiedenen Fluiden durchgeführt. Für die anschließenden Berechnungen des Wärmeübergangskoeffizienten wurden die in Tabelle 2.4 angegebenen Werte für die Fluide genutzt. Die genutzten Formeln und der Rechenweg wurden nach dem Schema der Berechnungen gemäß des VDI-Wärmeatlas (Verein Deutscher Ingenieure, 2006) durchgeführt und sind in Abschnitt 2.2.2.11 zu finden.

Als  $\Delta T$  wurde der an der Innenseite des Absorbers gemessene Wert von 0.02 *K* genutzt, der nach der in Abschnitt 2.2.2.6 beschriebenen Methode ermittelt wurde.

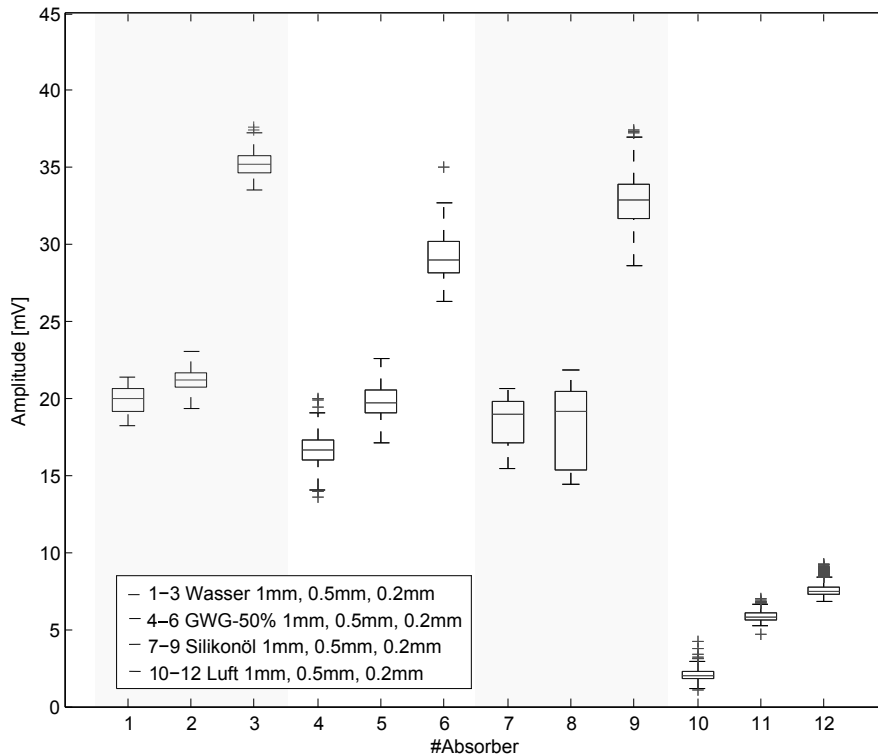
##### 3.4.2.1.1. Ergebnisse

###### Messergebnisse

Wie in Abbildung 3.21 zu sehen ist, sind die Unterschiede zwischen den Fluiden sehr gering, obwohl sich die thermischen Ausdehnungskoeffizienten teilweise um einen Faktor 14 (Wasser zu Luft) unterscheiden.

Für alle Fluide zeigt sich eine Zunahme der Stärke der Sensorantwort bei einer Abnahme der Absorberdicke. Beim Silikonöl kommt es bei der Nutzung des 0.5 *mm* dicken Absorbers zu einer größeren Streuung der Werte, vermutlich durch ein Eindringen von Luft in den Sensor während der Messungen und einer damit einhergehenden kontinuierlichen Verkleinerung der Sensorantwort über die Messdauer.

Die in Tabelle 3.15 aufgetragenen gemittelten  $NEP''$ -Werte der Messungen mit einem 0.2 *mm* dicken PEEK-HPV-Absorber zeigen für das Glycerol-Wasser-Gemisch aufgrund des geringen Rauschens der Messung den besten Wert, gefolgt von Wasser und Silikonöl. Luft zeigt mit Abstand die höchste  $NEP''$  und somit den schlechtesten Wert.



**Abbildung 3.21.:** Vergleich verschiedener Fluide gemessen mit 1 mm, 0.5 mm und 0.2 mm dicken PEEK-HPV-Absorbern,  $N = 5$

### Berechnungen

Anhand der in Abschnitt 2.2.2.11 vorgestellten Formeln kann der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{htc}$  für die verschiedenen Fluide bei Nutzung eines 0.2 mm dicken PEEK-HPV-Absorbers berechnet werden. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2.11 beschrieben, bilden die berechneten Werte aufgrund der wahrscheinlich nicht ganz passenden Koeffizienten nicht die realen Wärmeübergangskoeffizienten ab, sollten diesen aber nahe sein. Da sich durch die Koeffizienten das Verhältnis der errechneten Werte nicht ändert, ist ein Vergleich der Fluide in Hinblick auf ihre Eignung als Sensorfüllungen zulässig.

Die in Tabelle 3.16 dargestellten berechneten Wärmeübergangskoeffizienten zeigen erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fluiden. So ist der Wärmeübergangskoeffizient von Wasser viermal größer als von der des Silikonöls und fast doppelt so groß wie der des Glycerol-Wasser-Gemisches. Zudem ist der Wärmeübergangskoeffizient von Wasser etwa 57 mal größer als der von Luft und rund 11 mal so groß wie derjenige von Novec7100.

**Tabelle 3.15.:** Rauschspannung  $U_r$ , Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  und Noise-Equivalent-Power  $NEP''$  des Sensors mit 0.2 mm dickem PEEK-HPV-Absorber mit verschiedenen Fluiden

Fluid	$U_r$ [V]	$\mathfrak{R}$ [V/W]	$NEP''$ W/m <sup>2</sup>
Wasser	1.94E-04	0.767	1.432
GWG-50%	1.10E-04	0.635	0.977
Silikonöl	1.72E-04	0.713	1.366
Luft	1.53E-04	0.167	5.176

**Tabelle 3.16.:** Berechnete Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{htc}$  für Wasser, Luft Silikonöl, 50% Glycerol-Gemisch (GWG-50%) und Novec7100

Fluid	Wasser	Luft	Silikonöl	GWG-50%	Novec7100
$\alpha_{htc}$ [W/m <sup>2</sup> · K]	162.07	2.84	37.76	86.65	14.2

### 3.4.2.1.2. Bewertung der verschiedenen Sensorfluide bei Nutzung eines PEEK-HPV-Absorbers

Anhand der verschiedenen Wärmeübergänge der Fluide lassen sich die in Abschnitt 3.4.2.1 ermittelten Messergebnisse neu bewerten. Der minimale Unterschied in der Membranauslenkung der bei der Verwendung von Wasser und Silikonöl gemessen wurde steht im Widerspruch zu dem etwa viermal größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Silikonöls, lässt sich aber durch den etwa viermal geringeren Wärmeübergangskoeffizienten des Silikonöls erklären. Durch den geringeren Anteil an Wärmeenergie, der auf das Silikonöl übertragen wird, kommt es auch zu einer proportional geringeren Ausdehnung des Fluids.

Für Luft gestaltet sich dieser Vergleich etwas schwieriger. Betrachtet man zum Vergleich der Sensorfüllungen mit Luft und Wasser wieder die Ergebnisse aus Abschnitt 3.4.2.1, zeigt sich, dass eine Nutzung von Wasser als Sensorfüllung eine etwa 4.6 mal stärkere Sensorantwort zur Folge hat als eine Nutzung von Luft. Werden nun die thermischen Ausdehnungskoeffizienten und die Wärmeübergangskoeffizienten hinzugezogen zeigt sich, dass Luft einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat der mit  $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}^{-1}$  etwa 14 mal größer ist als der des Wassers mit  $0.25 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}^{-1}$  (bei 25°C). Der Wärmeübergangskoeffizient von Luft ist jedoch etwa 57 mal kleiner als der von Wasser.

Aufgrund des kleinen  $\alpha_{htc}$  von Luft gelangt also viermal weniger Wärmeenergie in das Fluid als für eine Ausdehnung um den gleichen Betrag wie durch das Wasser

verursacht nötig wäre. Die Differenz von 0.6 zwischen der 4.6-fach stärkeren Sensorantwort von Wasser und der um den Faktor vier geringeren Ausdehnung der Luft aufgrund des unterschiedlichen  $\alpha_{htc}$  lässt sich durch den Einfluss der Kompression der Luft während des Ausdehnungsvorganges erklären, der in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden konnte, die Differenz aber zumindest zum Teil verursacht.

Wird dieser Vergleich für das Glycerol-Wasser-Gemisch angestellt ergibt sich, dass der Wärmeübergangskoeffizient von Wasser etwa 1.87 mal größer ist als der des Gemisches. Die thermische Ausdehnung des Gemisches ist jedoch 1.94 mal so groß wie von Wasser. Nach dieser Rechnung sollten sich die beiden Füllungen also nur um 4% in Bezug auf die Größen der Sensorantworten unterscheiden. Die experimentell aufgenommenen Werte zeigen jedoch, dass Wasser eine 20% höhere Sensorantwort generiert. Aufgrund der nicht genau bekannten Materialwerte des Gemisches für den Bereich der genutzten Versuchstemperatur scheint dies dennoch eine vergleichsweise gute Näherung zu sein.

Für Novec7100 liegen aufgrund der in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Gründe keine Messdaten vor, allerdings lassen die Berechnungen darauf schließen, dass auch Novec7100 trotz seines mehr als siebenmal größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Vergleich zu Wasser nicht zu größeren Sensorantworten führen würde, da Wasser einen etwa 11 mal größeren Wärmeübergangskoeffizienten besitzt.

Die Berechnung des  $NEP''$  in Tabelle 3.15 zeigt für das Glycerol-Wasser-Gemisch einen sehr niedrigen Wert. Dies liegt am geringeren Grundrauschen, das für die Messungen ermittelt wurde. Die sehr hohe  $NEP''$  von Luft erklärt sich hingegen nicht durch ein besonders hohes Rauschen sondern, durch die sehr kleine Sensorantwort, die in der verwendeten Sensorkonfiguration gemessen wurde.

### 3.4.3. Vergleich der Fluide in einem Sensor mit IR-transmissivem Fenster

Für einen Vergleich des Einflusses der verschiedenen Fluide auf die Messergebnisse bei Nutzung des IR-transmissiven Fensters wurden Wasser, ein 50%iges Glycerol-Wasser-Gemisch (GWG-50%), Silikonöl und Luft als Sensorfüllung genutzt.

Anders als bei Nutzung eines Feststoffabsorbers (siehe Abschnitt 3.4.2.1) wurde hier die Sensorfüllung selbst als Absorber genutzt. Die Wärme, die durch die Absorption entstand, entstand also direkt in der Sensorfüllung. Da in Abschnitt 3.3.3 gezeigt wurde, dass die IR-Exposition der Membran, beziehungsweise des Dichtungsgummis das auf der Membran aufliegt, einen sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse hat, wurde hier die Membran bei den Messungen mit Luft mit einem kleinen Stück weißem Papier beschattet (vergleiche Abschnitt 2.2.2.5).



3.4.3.1. Ergebnisse

Ein Boxplot der Sensorantworten mit verschiedenen Fluiden als Sensorfüllen ist in Abbildung 3.22 gezeigt. Im Rahmen der für die neuen Befüllungen gezeigten Varianz entspricht die Sensorantwort mit Wasser als Füllung den Ergebnissen, wie sie auch in Abschnitt 3.3.1 ermittelt wurden.

Im Vergleich zu den anderen Fluiden zeigt Wasser mit einem Median von  $3.03\text{ mV}$  die zweitkleinste Sensorantwort. Die kleinste Sensorantwort zeigt der Sensor bei einer Füllung mit dem 50%igen Glycerol-Wasser-Gemisch; hier wird lediglich eine Median-Amplitude von  $2.35\text{ mV}$  erreicht.

Das Silikonöl zeigt von den getesteten Flüssigkeiten mit einem Median von  $5.93\text{ mV}$  die größte Sensorantwort; hier trat allerdings auch eine im Vergleich zu den anderen Fluiden große Varianz der Werte auf (Varianz =  $0.21\text{ mV}$  im Vergleich zu  $\leq 0.086\text{ mV}$  bei den anderen genutzten Fluiden). Eine Füllung des Sensors mit Luft bei einer beschatteten Membran zeigt mit einem Median von  $5.35\text{ mV}$  nur geringfügig kleinere Sensorantworten als mit Silikonöl bei einer deutlich geringeren Varianz.

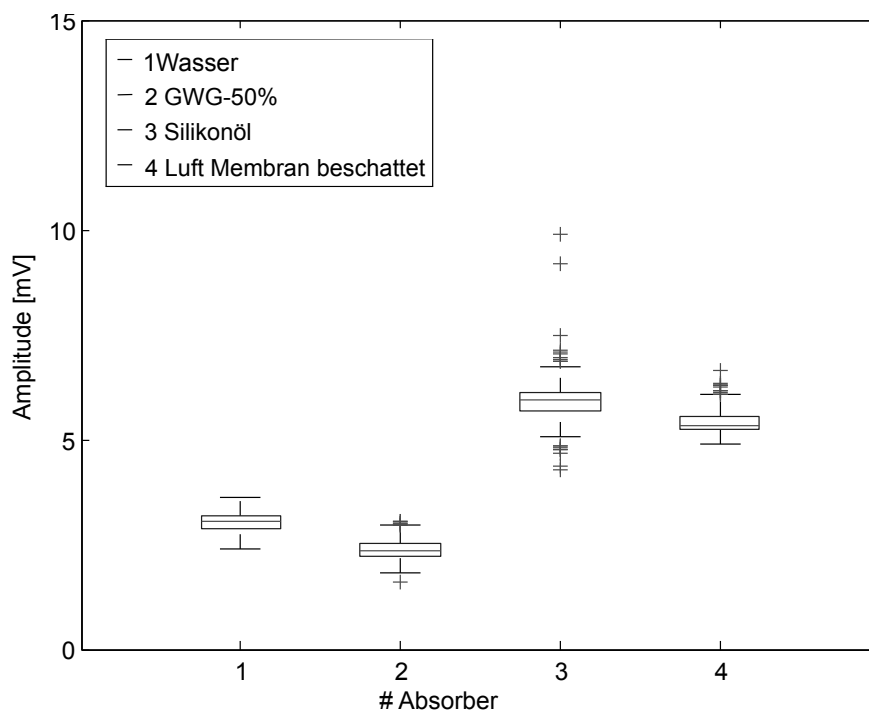


Abbildung 3.22.: Vergleich der Sensorantworten mit verschiedenen Fluiden als Sensorfüllung bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters,  $N = 5$

**Tabelle 3.17.:** Rauschspannung  $U_r$ , Empfindlichkeit  $\mathfrak{R}$  und Noise-Equivalent-Power  $NEP''$  des Sensors mit IR-transmissivem Fenster mit verschiedenen Fluiden

Fluid	$U_r$ [V]	$\mathfrak{R}$ [V/W]	$NEP''$ [ $W/m^2$ ]
Wasser	1.62E-04	0.066	13.887
GWG-50%	2.58E-04	0.052	28.287
Silikonöl	4.44E-04	0.129	19.532
Luft	1.13E-04	0.118	5.424

Dies spiegelt sich auch in den in Tabelle 3.17 gezeigten Werten für die Empfindlichkeit und die  $NEP''$  des Sensors mit verschiedenen Fluiden wider. Hier zeigt sich, dass der Sensor bei Verwendung von Luft mit einem Wert von  $5.4 W/m^2$  nicht nur die beste  $NEP''$  aufweist, sondern auch die zweithöchste Empfindlichkeit und die kleinste Rauschspannung.

Bei einer Verwendung von Silikonöl zeigt der Sensor, trotz der größeren Empfindlichkeit, aufgrund des hohen Rauschens mit einer Noise-Equivalent-Power ( $NEP''$ ) von circa  $19.5 W/m^2$  nur einen vergleichsweise schlechten Wert und liegt damit deutlich über der  $NEP''$  von Wasser mit etwa  $13.9 W/m^2$ . Lediglich bei Nutzung des Glycerol-Wasser-Gemisches zeigt der Sensor mit etwa  $28.3 W/m^2$  eine noch schlechtere  $NEP''$  und auch die kleinste Empfindlichkeit.

### 3.4.3.2. Bewertung der verschiedenen Sensorfluide bei Nutzung eines IR-transmissiven Fensters

Ein hoher Wärmeübergangskoeffizient ist, anders als in Abschnitt 3.4.2.1, bei der Nutzung des IR-transmissiven Fensters nicht vorteilhaft, da die Wärme direkt im Fluid durch die Absorption der Strahlung entsteht. Hier ist vielmehr wichtig wieviel Wärme im Fluid entsteht und auch während einer fortlaufenden IR-Exposition verbleibt. Silikonöl absorbiert in einem schmalbandigen Bereich um die  $3 \mu m$  zwar sehr gut, ansonsten liegt die Transmission allerdings deutlich über 80% (Chalmers et al., 2012).

Dadurch, dass es über große Bereiche zu einer stärkeren Transmission kommt, wird die energiereiche Strahlung von Wellenlängen außerhalb der Absorptionsbande tiefer in die Flüssigkeit eindringen, als dies bei Wasser der Fall ist. Da hierdurch eine breitere Grenzfläche entsteht, wird, wie die Simulationen in Klocke et al. (2011) gezeigt haben, weniger Wärme über das IR-transmissive Fenster verlorengehen. Zudem ist der Wärmeübergangskoeffizient des Silikonöls im Vergleich zu den anderen getesteten Fluiden recht gering, wie in Abschnitt 3.4.2.1 am Beispiel des PEEK-HPV-Absorber gezeigt. Durch diese beiden Faktoren sollte also mehr

Wärme im Fluid akkumulieren und es könnte zu einer stärkeren Ausdehnung kommen. Hinzu kommt der deutlich größere thermische Ausdehnungskoeffizient des Silikonöls, der ebenfalls einen großen Einfluss auf die Sensorantwort des Fluids haben wird.

Das große Rauschen in den Messungen mit Silikonöl spiegelt sich jedoch deutlich in der hohen Noise-Equivalent-Power wieder. Sollte das Rauschen durch die Absorption der Strahlung im Silikonöl bedingt sein, wäre Silikonöl für Sensorkonfiguration mit IR-transmissivem Fenster nicht geeignet. Der Ursprung des hohen Rauschens konnte durch die Messungen allerdings nicht gezeigt werden.

Auch bezüglich der kleinen Sensorantworten bei Nutzung des Glycerol-Wasser-Gemisches ist ein Betrachten der Absorptionseigenschaften sinnvoll. Werden die Absorptionsspektren von Glycerol und Wasser verglichen, zeigt sich, dass Glycerol, wie auch Wasser, eine sehr hohe Absorption im für den Versuch wichtigen Wellenlängenbereich besitzt. Möglicherweise kommt es hier durch die Kombination dieser zwei guten Absorber zu einer Verbesserung der Absorptionseigenschaften über die in diesem Experiment wichtige IR-Bandbreite von  $3 - 5 \mu\text{m}$ . Diese breitere Absorption hätte eine noch dünnere erwärmte Grenzschicht zur Folge als es für Wasser in Klocke et al. (2011) bereits gezeigt werden konnte. Diese dünnere und somit stärker erwärmte Grenzfläche würde zusammen mit dem hohen Wärmeübergangskoeffizienten des Gemisches einen Übergang der Wärme auf das Fenster begünstigt. Die gleiche Hypothese trifft demnach ebenfalls für reines Wasser als Sensorfüllung mit seiner hohen Absorption und seinem hohen Wärmeübergangskoeffizienten zu.

Da Luft selbst kaum IR-Strahlung absorbieren kann, wird die Strahlung bei einer Sensorkonfiguration mit Fenster aber ohne zusätzlichen Absorber primär von der Innenwand des Sensors, also dem PVC, absorbiert. Diese hat durch die Verbindung zur gesamten Sensorbasis eine große thermische Masse. Ähnlich wie bei einer Erwärmung der Absorber wird auch hier wahrscheinlich die umgebende Luft, also in diesem Falle die Luft in der Druckkammer, in geringem Maße aufgewärmt. Ein Großteil der Wärme verbleibt aber im PVC und kann aufgrund des sehr geringen Wärmeübergangskoeffizienten der Luft (siehe Tabelle 3.16) nicht aufgenommen werden. Diese Erwärmung ist also vermutlich sehr gering im Vergleich zu einer Erwärmung der Luft durch einen Absorber mit geringer thermischer Masse, der vollkommen von der Luft in der Druckkammer umgeben ist.

Versuche mit einem solchen Sensor mit IR-transmissivem Fenster, Luft als Sensorfüllung und zusätzlichen IR-Absorbern sind in Abschnitt 3.4.4 zu finden. Auch in der hier untersuchten Sensorkonfiguration mit IR-transmissivem Fenster ohne zusätzlichen Absorber zeigt der Sensor bei einer Verwendung von Luft aufgrund der vergleichsweise großen Sensorantwort und der geringen Rauschspannung jedoch bereits die beste Noise-Equivalent-Power.

### 3.4.4. Nachbau einer einfachen Golayzelle

Nachdem die bisherigen Messungen mit IR-transmissivem Fenster im Vergleich mit Feststoffabsorbern nur kleine Sensorantworten gezeigt haben, soll hier der Sensor für eine Verwendung des IR-transmissiven Fensters optimiert werden. Die Messungen hierfür sollen mit Luft, die in den Messungen in Abschnitt 3.3.5.6 mit IR-transmissivem Fenster die beste  $NEP''$  gezeigt hat, durchgeführt werden.

Da Luft selbst ein sehr schlechter Absorber ist sind in allen Golayzellen, also kommerziellen Sensoren mit Luft als Sensorfluid und einer Membran, die sich durch die sich ausdehnende Luft auslenkt, zusätzliche Absorber eingebracht. Luft hat jedoch einen deutlich größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als Flüssigkeiten (siehe Tabelle 2.6 in Abschnitt 2). Im Gegensatz zu den meisten Fluiden ist sie allerdings komprimierbar. Diese Kompression muss erst überwunden werden, bevor es zum Aufbau eines Drucks in der Druckkammer kommen kann.

Eine Beschreibung des Versuchsaufbaus, der verwendeten Absorber sowie der Verspiegelung der Innenwände der Druckkammer ist in Abschnitt 2.2.2.10 zu finden.

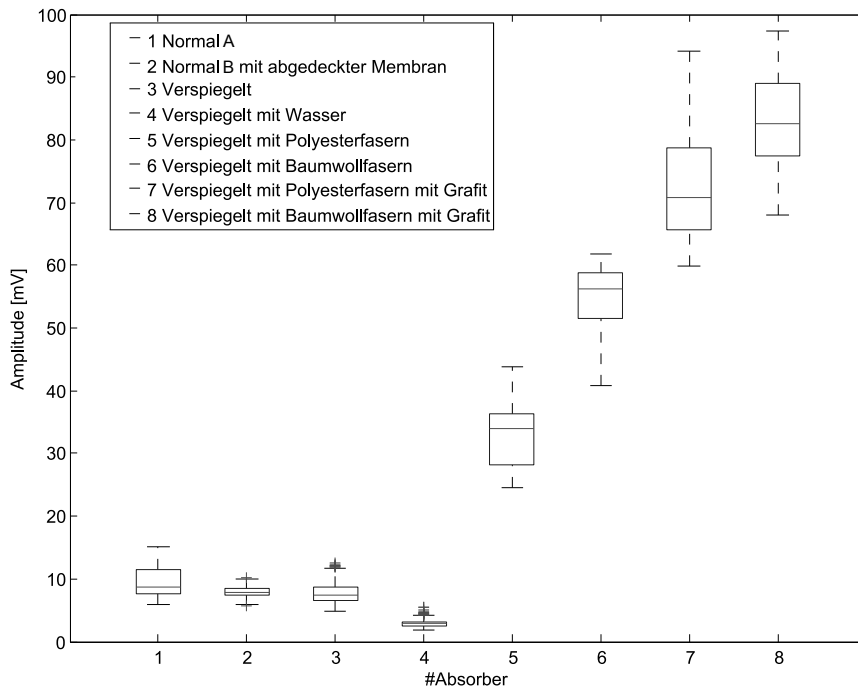
#### 3.4.4.1. Ergebnisse

Die Sensorantworten für einen Sensor nach Golayzellenbauart sind in Abbildung 3.23 in Form eines Boxplots dargestellt.

Ein Vergleich zwischen der normalen, nicht optimierten, Sensorkonfiguration („Normal A“) und einer Konfiguration mit abgedeckter Membran („Normal B mit beschatteter Membran“) zeigt, dass es hier nur einen sehr kleinen, jedoch signifikanten Unterschied zwischen den Sensorantworten gibt (Vergleich von Absorber 1 zu 2, Kruskal-Wallis-Test  $P = 0$ ). Die Sensorantwort und die Varianz sind etwas kleiner, wenn die Membran abgedeckt wird; eine große Differenz zwischen den Sensorantworten wie in Abschnitt 3.3.3 aufgrund der Bestrahlung des Dichtungsgummis beschrieben ist hier nicht mehr festzustellen.

Eine Verspiegelung der Sensorinnenseite resultierte zunächst in einer geringen aber signifikanten Verschlechterung der Sensorantwort (Vergleich Absorber 3 zu 1, Kruskal-Wallis-Test  $P = 0$ ). Wie auch in Abschnitt 3.4.3 zeigte sich hier, dass der Sensor mit IR-transmissivem Fenster eine größere Sensorantwort zeigt, wenn er mit Luft statt Wasser gefüllt wird (Vergleich von Absorber 1 zu 4).

Werden zusätzliche Absorber in Form von dünnen IR-absorbierenden Fasern in die Druckkammer gegeben, erhöht sich die Sensorantwort gegenüber der Sensorantwort ohne zusätzliche Absorber wie bei den Konfigurationen „Normal A“ und „Normal B mit beschatteter Membran“ deutlich. Hierbei führt Baumwolle mit einer Zunahme



**Abbildung 3.23.:** Boxplot der Sensorantworten bei verschiedenen Konfigurationen des Sensors als Golayzelle,  $N = 5$

der Sensorantwort um etwa 1000% (Vergleich von Absorber 6 zu 1) zu einer größeren Zunahme als die Polyesterfasern, die die Stärke der Sensorantwort um etwa 700% vergrößern (Vergleich von Absorber 5 zu 1).

Werden die Fasern zusätzlich mit Grafit beschichtet, zeigt sich nochmals eine erhebliche Zunahme des Sensorsignals, wobei die Zunahme bei den beschichteten Polyesterfasern größer ist (225%) als bei der beschichteten Baumwolle (152%). Die Messungen mit beschichteter Baumwolle zeigen aber dennoch die größte Sensorantwort.

Die ermittelten Empfindlichkeiten und  $NEP''$  der verschiedenen Golayzellenkonfigurationen bilden die gemessenen Amplitudenstärken sehr gut ab. Die Konfigurationen mit den höchsten Antwortamplituden zeigen auch die höchste Empfindlichkeit ( $\mathfrak{R}$ ) und die niedrigste Noise-Equivalent-Power ( $NEP''$ ). Auffällig ist, dass alle Messungen ein sehr großes Rauschen zeigen, das mit zunehmender Empfindlichkeit des Sensors ebenfalls größer wurde.

**Tabelle 3.18.:** Gemittelte Rauschspannung  $U_r$ , Signal-to-Noise-Ratio SNR und Noise-Equivalent-Power  $NEP''$  des Sensors in verschiedenen Golayzellenkonfigurationen, 1-Normal A (ohne Optimierung), 2-Normal B mit abgedeckter Membran, 3-Verspiegelt, 4-Verspiegelt mit Wasser, 5-Verspiegelt mit Polyesterfasern, 6-Verspiegelt mit Baumwollfasern, 7-Verspiegelt mit Polyesterfasern mit Grafit, 8-Verspiegelt mit Baumwollfasern mit Grafit

Konfiguration	$U_r$ [V]	$\Re$ [V/W]	$NEP''$ W/m <sup>2</sup>
1	4.54E-04	0.1998	12.849
2	5.79E-04	0.1673	19.5934
3	6.93E-04	0.1627	24.0935
4	3.48E-04	0.0587	33.5718
5	6.23E-04	0.7046	5.0052
6	6.06E-04	1.1701	2.9313
7	8.00E-04	1.596	2.8355
8	7.62E-04	1.7823	2.4205

### 3.4.4.2. Bewertung der verschiedenen Golayzellenkonfigurationen

Die niedrigen Sensorantworten bei einer versilberten Basis ohne zusätzliche Absorber kommen vermutlich durch eine Reflexion der Strahlung aus der Druckkammer zustande, durch die ein Teil der Strahlung wieder durch das IR-transmissive Fenster aus der Druckkammer entweicht.

Durch zusätzliche Absorber in der Kammer wird diese Strahlung absorbiert. Da die Wände der unversilberten Basis die Strahlung absorbieren und sich erwärmen, wird ein nur geringer Teil der Wärme an die Luft innerhalb der Druckkammer abgegeben (vgl. Abschnitt 3.3.5.6), die meiste Wärme wird im PVC verbleiben. Deutlich effizienter ist es, wenn die Strahlung von der Luft in der Kammer direkt absorbiert wird oder aber, da dies nicht möglich ist, von einem Absorber mit einer geringen spezifischen Wärmekapazität und Masse der von der Luft in der Kammer umgeben ist und die Wärme unmittelbar an die Luft abgeben kann. Die Sensorbasis hingegen leitet die Wärme ungerichtet auch an nicht an der Signalgenerierung beteiligte Sensorkomponenten weiter.

Eine starke Verbesserung der Sensorantwort durch einen zusätzlichen Absorber in der Druckkammer konnte durch die Zugabe der Fasern in den Sensor bestätigt werden. Die zusätzliche Beschichtung der Fasern hat vermutlich die Absorption erhöht und somit den Anteil der Strahlung, der von den Fasern wieder aus dem IR-transmissiven Fenster heraus reflektiert wird, weiter minimiert.

Anders als in den vorherigen Messungen mit direkt bestrahlter Membran (siehe Ab-

schnitt 3.3.3) kommt es hier durch die Verwendung eines nicht der Strahlung exponierten O-Ringes bei der Bestrahlung der Membran nicht mehr zu einer Bestrahlung des Dichtungsgummis und einer dadurch verfälschten Sensorantwort.

### 3.4.5. Fazit aus den Versuchen mit verschiedenen Sensorfluiden

Die durchgeführten Experimente und Simulationen mit PEEK-HPV als Absorber und dem Sensor mit IR-transmissivem Fenster zeigen deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse nach den wichtigsten Kriterien geordnet ist in Tabelle 3.19 zu finden.

Die Nutzbarkeit der einzelnen Fluide wurde anhand der Abnahme der Signalstärke über die Zeit mithilfe eines Sensors mit PVC-Absorber ermittelt. Lediglich Novec7100 zeigte über 400 Expositionen ein zu stark abnehmendes Signal, so dass es nicht für weitere Messungen genutzt wurde. Wasser, das 50%ige Glycerol-Wasser-Gemisch (GWG-50%), Silikonöl B10 und Luft konnten für weitere Experimente genutzt werden.

Auch mit diesen Fluiden konnten jedoch über die Versuchszeiträume keine durchgehend gleichbleibende Sensorsignale erzielt werden, wie beispielsweise anhand der Varianzen in den Abbildung 3.21 und 3.22 zu sehen ist. Hier zeigen sich allerdings deutliche Unterschiede zwischen den Messungen mit PEEK-HPV, das bei den meisten Messungen eine recht große Varianz zeigt, und dem IR-transmissiven Herasil-Fenster, bei dem die Varianzen, wie allerdings auch die Antwortamplituden, deutlich kleiner sind. Bei beiden Sensorkonfigurationen zeigt sich, dass Luft als Sensorfüllung die geringsten Varianzen bei den Messungen zeigt, Silikonöl hingegen die größten. Nur in der Golayzellenkonfiguration zeigte Luft sehr große Varianzen, was womöglich auf die Nutzung einer anderen, wenn auch baugleichen, Sensorbasis zurückzuführen ist.

Die Sensorantworten der Sensorkonfigurationen mit PEEK-HPV und dem IR-transmissivem Fenster werden getrennt voneinander betrachtet, da sich die Art der Wärmeübertragung/-erzeugung grundsätzlich voneinander unterscheiden. Während beim Fenster die Wärme durch die Absorption der Strahlung im Fluid auch dort entsteht, absorbiert beim PEEK-HPV-Absorber der Kunststoff und gibt die Wärme anschließend an das Fluid weiter.

Bei einer Nutzung des PEEK-HPV-Absorbers korreliert die Stärke der Antwortamplitude deutlich mit der Größe des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{htc}$  und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Fluide. Wie in Tabelle 3.16 gezeigt, hat Wasser mit Abstand den größten Wärmeübergangskoeffizienten. Der im Vergleich zu den anderen Fluiden geringe thermische Ausdehnungskoeffizient des Wassers

**Tabelle 3.19.:** Kriterienkatalog zur Auswahl eines geeigneten Sensorfluids,  
 Nutzbarkeit: Fluid erzeugt konstantes Signal über die Messzeit, Reproduzierbarkeit: Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, Empfindlichkeit: Empfindlichkeit des Sensors, Kompatibilität: Kunststoff-/Kleber kompatibel, Toxizität: Giftigkeit des Fluids, zus. Absorber: Einbringung eines zusätzlichen Absorbers. +  $\hat{=}$  gut, o  $\hat{=}$  ausreichend, -  $\hat{=}$  schlecht, --  $\hat{=}$  sehr schlecht. GWG-50% - 50%iges Glycerol-Wasser-Gemisch

PVC					
	Wasser	Silikonöl	Novec7100	GWG-50%	Luft
Nutzbarkeit	+	+	-	+	+
PEEK-HPV 0.2 mm					
	Wasser	Silikonöl	Novec7100	GWG-50%	Luft
Reproduzierbarkeit	+	o		+	+
Empfindlichkeit	+	+		-	-
<i>NEP''</i>	+	+		++	-
Kompatibilität	+	+	+	+	+
Toxizität	-	-	-	-	-
IR-trans. Fenster					
	Wasser	Silikonöl	Novec7100	GWG-50%	Luft
Reproduzierbarkeit	+	o		+	+
Empfindlichkeit	o	+		-	+
<i>NEP''</i>	-	-		--	+
zus. Absorber	-				++
Kompatibilität	+	+	-	+	+
Toxizität	-	-	-	-	-



wird durch den höheren Anteil an Energie, die an das Wasser übertragen werden kann, kompensiert. Dies zeigt sich auch in der, im Vergleich zu den anderen gemessenen Fluiden, höchsten gemessenen Empfindlichkeit des Sensors mit Wasser als Sensorfüllung (siehe Tabelle 3.15). Bei einer Verwendung von Wasser erzeugt der Sensor somit trotz seines geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Wassers die größten Sensorantworten.

Die Entstehung der Wärme direkt im Fluid führt bei der Verwendung eines IR-transmissiven Fensters dazu, dass die Größe der Sensorantwort stark von dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie den Absorptions- und Transmissions-eigenschaften des Fluids abhängt. So kommt es bei einer Nutzung von Silikonöl in einem Sensor mit IR-transmissivem Fenster zur größten Sensorantwort respektive Empfindlichkeit (siehe Tabelle 3.17). Das Silikonöl hat den größten thermischen Ausdehnungskoeffizienten der genutzten Flüssigkeiten und zeigt nach Absorption der IR-Strahlung wahrscheinlich eine breitere erwärmte Grenzschicht, als diese bei Wasser aufgrund dessen sehr starker IR-Absorption zu erwarten ist. Luft besitzt zwar einen größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten, absorbiert selbst jedoch kaum IR-Strahlung, was im getesteten Sensor wahrscheinlich ein Schlüsselfaktor für die im Vergleich zu Silikonöl geringere Empfindlichkeit des Sensors ist.

Durch das geringere Rauschen der Messungen mit Luft als Sensorfüllung zeigt der Sensor bei einer Verwendung dieser allerdings mit Abstand die beste Noise-Equivalent-Power ( $NEP''$ ). In Abschnitt 3.4.4 ist anhand einer einfachen Golayzellenkonfiguration gezeigt, dass die Sensorantworten sehr viel größer werden, wenn in den luftgefüllten Sensor mit IR-transmissivem Fenster ein zusätzlicher Absorber eingebracht wurde.

Ein Vergleich der Ergebnistabellen 3.15, 3.17 und 3.18 zeigt, dass die höchsten Empfindlichkeiten zwar mit einer optimierten Golayzelle erreicht werden können, die Noise-Equivalent-Power jedoch mit allen Fluiden (außer Luft) bei Nutzung eines 0.2 mm dicken PEEK-HPV-Absorbers besser ist. Dies liegt vor allem am niedrigen Rauschen der Messungen mit dem PEEK-HPV-Absorber im Vergleich zu den Messungen mit der Golayzellenkonfiguration. Zur Optimierung der Sensorkonfigurationen muss also entweder die Empfindlichkeit erhöht (z.B. durch eine weitere Reduzierung der Absorberschichtdicke im Falle von PEEK-HPV) oder das Rauschen minimiert werden.

Da bei der Auswahl eines IR-Sensors besonders die  $NEP''$  wichtig ist zeigt dies, dass eine Nutzung von Feststoffabsorbern wie in diesem Falle PEEK-HPV durchaus sinnvoll sein kann.

Bei der Auswahl der verschiedenen Sensorfluide muss auf die Kompatibilität der Fluide mit den Materialien der Sensorbasis und der Absorber geachtet werden. Besonders die Klebungen des IR-transmissiven Fensters und der dünnen PVC-Absorber verhindern eine Nutzung von Lösungsmitteln wie Ethanol. Auch

### Kapitel 3. Ergebnisse

---

Aceton, das vielversprechende Materialwerte für eine Nutzung als Sensorfluid zeigt, ist nicht mit PVC kompatibel.

Weil das Befüllen des Sensors immer recht große Mengen an Fluid benötigt und um die Handhabung der Sensorkomponenten grade beim Befüllvorgang unproblematisch zu gestalten, wurde zudem darauf geachtet, dass keine stark toxischen Materialien genutzt wurden. Die meisten toxischen Materialien mit möglicherweise interessanten thermophysikalischen Materialwerten wären allerdings auch aufgrund ihrer Nicht-Kompatibilität mit den Sensorbasis- und Absorbermaterialien nicht geeignet.

# Kapitel 4.

## Diskussion

Zunächst sollen die Ergebnisse und das Optimierungspotential des technischen Sensors diskutiert werden. Anschließend wird das biologische Modell in einem Reverse-Bionik-Ansatz betrachtet. Durch diesen sollen die mit den technischen Sensor erzielten Ergebnisse in Hinblick auf bisher nicht im Detail verstandene Eigenschaften des Käfersensillum diskutiert werden.

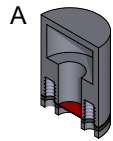
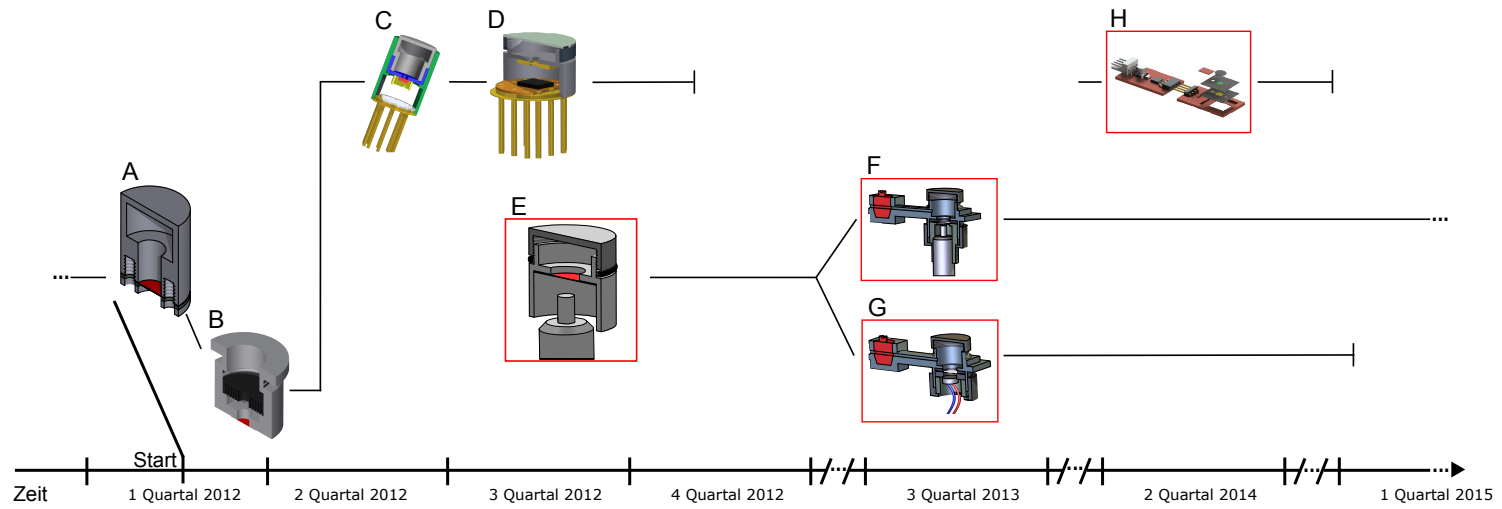
Abbildung 4.1 zeigt in einem Überblick alle für diese Dissertation entwickelten Sensorprototypen.

### 4.1. Diskussion des technischen Sensors anhand seiner einzelnen Komponenten

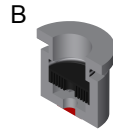
Die Kriterien, anhand derer die getesteten Ausleseeinheiten, Absorber und Fluide in den jeweiligen Ergebnisteilabschnitten bereits bewertet wurden, sind hier zur Übersicht nochmals in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Für die Auswahl einer geeigneten Ausleseeinheit des Sensors ist besonders die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse von großer Bedeutung. Diese begründet sich vor allem aus einem möglichst konstanten Signal-to-Noise-Ratio und einem gleichbleibenden Sensorsignal über die gesamte Messdauer. Da auch die Güte der Sensorantwort stark von der Ausleseeinheit abhängig ist, ist auch diese ein wichtiger Faktor bei der Auswahl einer Ausleseeinheit. Um eine hohe Güte des Sensors zu erreichen ist eine hohe Empfindlichkeit und eine geringe Rauschspannung, also eine kleine Noise-Equivalent-Power ( $NEP''$ ), erforderlich.

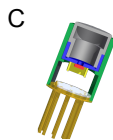
Zudem ist die problemlose Verfügbarkeit der Ausleseeinheit von großer Bedeutung, besonders in Anbetracht einiger Verluste im Falle der kapazitiven Ausleseeinheiten aus dem FZ caesar. Die Wiederverwendbarkeit der Ausleseeinheiten reduzierte



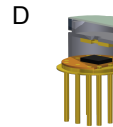
**A** Sensor aus CFRP mit silberbeschichteter Kunststoffmembran und kapazitivem Wegaufnehmer als Ausleseeinheit. Probleme: Sensor war undicht und es traten Probleme beim Auslesen der Membran durch Defekte in der Beschichtung auf.



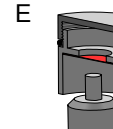
**B** Sensor mit strukturiertem Absorber und einem kapazitivem Wegaufnehmer als Ausleseeinheit, der gegen eine Membran mit kleinem geerdeten Metallplättchen maß. Probleme: Die Messungen waren nicht reproduzierbar und der Sensor undicht.



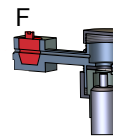
**C** Sensor mit Plattenkondensator der TU Dresden und nicht kompatibler I2C Schnittstelle. Probleme: Nicht gut zu befüllen, da der Sensor vollständig untergetaucht werden musste. Die Messungen ergaben keine identifizierbaren Sensorantworten.



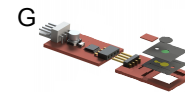
**D** Neues Design zur einfacheren Befüllung des Sensors. Die in Abschnitt 2.2.2 vorgestellte Befüllkammer war nutzbar. Plattenkondensatoren aus dem FZ caesar. Probleme: Die Messungen ergaben keine identifizierbaren Sensorantworten.



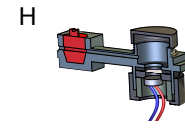
**E** Sensor mit verklebter, leitender Membran und kapazitivem Wegaufnehmer als Ausleseeinheit. Probleme: Lösung der Klebung und starke Druckzunahme bei Verschraubung des Absorbers führen zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen.



**F** Neue Sensorbasis mit Möglichkeit zum Druckabbau während der Befüllung. Membran angepresst statt geklebt. Gut reproduzierbare Messergebnisse bei für die Experimente ausreichender Empfindlichkeit.



**G** Sensorprototyp aus dem Fz caesar mit Plattenkondensator. Probleme: Mit Luft ist die Empfindlichkeit niedrig und die Reproduzierbarkeit nicht ausreichend; Messungen mit Wasser ergaben keine identifizierbaren Sensorantworten.



**H** Sensor mit durch Membran geschütztem Elektret-Mikrofon als Ausleseeinheit. Probleme: Auch nach Test von 6 verschiedenen Membranen keine reproduzierbaren Messungen möglich. In Mikrofon integrierter FET mit zu geringer Zeitkonstante.

die Kosten und den benötigten Zeitaufwand für die Experimente. Besonders der kapazitive Wegaufnehmer konnte hier überzeugen. Ein weiterer wichtiger Faktor war die Kompatibilität mit der vorhandenen DAQ-Elektronik. Im Fall der Ausleseeinheiten aus dem FZ caesar wurde deutlich, dass eine andere DAQ-Elektronik, die keine Systemlösung war, sondern aus für diesen Zweck konzipierter Elektronik mit einem eigens dafür geschriebenen Programm bestand, einen großen zusätzlichen Zeitaufwand erforderte.

Der ursprüngliche Plan, mikrosystemtechnisch hergestellte Kapazitäten aus dem FZ caesar in einer eigenen Sensorbasis zu nutzen, ist zunächst an der fragilen Bauweise und der mangelnden Verfügbarkeit der Kapazitäten gescheitert. Die für diese Arbeit durchgeführten Messungen mit den im FZ caesar hergestellten Sensoren, in denen die oben genannten Kapazitäten verbaut wurden, sind auf ihre Reproduzierbarkeit getestet worden (siehe Kapitel 3.2.1). Die Sensoren waren jedoch selbst in der Golayzellenbauweise so unempfindlich, dass die Empfindlichkeit nicht für weitere Versuche ausreichte. Die mit Wasser gefüllten Sensoren waren zudem nicht ausreichend versiegelt, so dass sich Luftblasen in der Sensorkammer befanden, die den Sensor schließlich unbrauchbar machten.

In einem weiteren Experiment wurde versucht kleine Elektret-Mikrofone als Ausleseeinheiten zu nutzen (siehe Kapitel 3.2.2). Diese hatten den großen Vorteil in großer Zahl günstig verfügbar und mit der bestehenden Datenaufnahmeelektronik kompatibel zu sein. Das Testen von sechs verschiedenen Membranen zum Schutz des Mikrofons und der Transduktion der mechanischen Auslenkung der Membran zu einem Luftdruckimpuls erbrachte keine geeignete Konfiguration mit einer zufriedenstellenden Reproduzierbarkeit. Auch der eingebaute Feld-Effekt-Transistor, der die Empfindlichkeit für Chopperfrequenzen unter  $10\text{ Hz}$  deutlich verschlechterte, war für eine Verwendung des Mikrofons als Ausleseeinheit für den IR-Sensor sehr ungünstig.

Als dritte Ausleseeinheit wurde ein kommerziell erhältlicher kapazitiver Wegaufnehmer getestet (siehe Kapitel 3.2.3). Auch hier wurde eine Membran genutzt, um Flüssigkeit und Wegaufnehmer zu trennen und eine flexible Oberfläche zu schaffen, gegen die der Wegaufnehmer eine Abstandsmessung durchführen konnte. Der kapazitive Wegaufnehmer konnte durch seine Frequenzunabhängigkeit, hohe Empfindlichkeit, geringe  $NEP''$  und hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

---

**Abbildung 4.1. (gegenüberliegende Seite):** Chronologischer Überblick über alle für diese Dissertation entwickelten Sensorprototypen. Die Abbildungen zeigen CAD-Modelle der Prototypen. Die Länge der schwarzen Linien zeigt an, wie lange mit den jeweiligen Prototypen gearbeitet wurde. Alle Sensoren, deren Messergebnisse Eingang in diese Arbeit gefunden haben, sind rot umrandet.

überzeugen und wurde daher als Ausleseinheit für die Evaluation von verschiedenen Absorbern und Fluiden genutzt.

Um das photomechanische Prinzip des Käfers möglichst gut technisch umzusetzen, wurde nicht nur ein Fluid- (Kahl et al., 2014), sondern auch ein Feststoffabsorber mit Kontakt zum Fluid als Absorber getestet. Da die Strahlung aufgrund der Größe des Sensors nicht bis in das Fluid vordringen konnte ohne ein schlecht wärmeisolierendes IR-transmissives Fenster zu nutzen, wurden zur Untersuchung der Einflüsse der verschiedenen Wärmeübergänge getrennte Versuche durchgeführt. Durch den modularen Aufbau des Sensors konnte die gleiche Sensorbasis sowohl für Versuche mit Feststoffabsorbern als auch mit dem IR-transmissiven Fenster für diese Versuche genutzt werden.

In der Sensorkonfigurationen mit IR-transmissivem Fenster konnte ein Wärmeübergang vom Fluid auf einen Feststoff untersucht werden. Im Käfer entspricht dies einem Wärmeübergang vom absorbierenden Fluid im Sensillum auf die umgebende Meso- bzw. Exokutikula. In der zweiten Sensorkonfiguration mit einem absorbierenden Feststoffabsorber konnte ein Wärmeübergang vom Feststoff auf ein Fluid untersucht werden, was im Käfer einem Wärmeübergang vom exokutikulären Mantel oder der Mesokutikula auf das Fluid im Sensillum entspricht.

Anhand von Messungen mit Feststoffabsorbern aus sieben verschiedenen Materialien konnte gezeigt werden, dass nicht nur mit einem IR-transmissiven Fenster, sondern auch mithilfe von PEEK-HPV-Feststoffabsorbern ein deutlicher Einfluss einer Fluidausdehnung in der Druckkammer messbar war (siehe Abschnitt 3.3.5.2). Der Einfluss der Fluidausdehnung auf die gemessene Gesamtausdehnung ist bei PEEK-HPV-Absorbern vor allem aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der starken Erwärmung der Absorber durch die Absorption von IR-Strahlung sehr groß. Die starke Erwärmung des Absorbers wird durch die wahrscheinlich starke Absorption der IR-Strahlung zusammen mit der geringen Dichte und der wahrscheinlich niedrigen spezifischen Wärmekapazität begünstigt. Durch den geringen thermischen Ausdehnungskoeffizient des PEEK-HPVs dehnt sich dieses nur in einem geringen Maße aus, wodurch der Einfluss der Fluidausdehnung besonders deutlich zu erkennen war.

Durch Simulationen der Wärmeverteilung in einem PEEK-HPV-Absorber wurde untersucht, welchen Einfluss die Parameter Absorberschichtdicke, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Dichte auf die Gesamtausdehnung des Absorbers haben (siehe Abschnitt 3.3.6).

Diese vier Parameter sind von entscheidender Bedeutung für die Stärke der Erwärmung des Sensors an der Fluid/Absorber-Grenzfläche und somit auch für

den Anteil der Fluidausdehnung an der Gesamtausdehnung der Membran. Durch eine Verringerung der Schichtdicke wird nicht nur das zu erwärmende Volumen des Absorbers verringert, sondern auch die Strecke, über die die Wärme im Absorbermaterial weitergeleitet werden muss. Eine geringe Absorberschichtdicke resultiert in einer stärkeren Erwärmung des Fluids und einer schnelleren Weiterleitung der Wärme an dieses. Da die Schichtdicken für die Experimente nicht beliebig minimiert werden konnten, wurden die stärksten Sensorantworten allerdings nicht mit den dünnsten Absorbern, sondern mit dicken Absorbern aus Materialien mit hohem thermischem Ausdehnungskoeffizienten gemessen. Die Signalgenerierung geht bei dickschichtigen Absorbern vermutlich primär auf das sich nach innen ausdehnende Absorbermaterial zurück, wobei das Fluid die Druckzunahme auf die Membran fokussiert, wodurch diese ausgelenkt wird.

Zudem zeigte sich, dass die Gesamtausdehnung des Systems exponentiell steigt, wenn die Schichtdicke reduziert wird; die Absorberdicke hat somit von allen untersuchten Parametern den größten Einfluss auf die Gesamtausdehnung. In der Praxis wird dieser Effekt durch den kontinuierlich größer werdenden Widerstand, den die Membran einer fortschreitenden Auslenkung entgegenbringt, stark begrenzt, es zeigt aber, dass die Absorberdicke eine wichtige Stellschraube ist um die Sensitivität des Sensors zu erhöhen. Die weiteren untersuchten Materialparameter lassen sich - anders als die Absorberschichtdicke - nicht einfach ändern, die Simulationen können aber bei der Auswahl zukünftiger Absorbermaterialien hilfreich sein. So ist beispielsweise zu erkennen, dass ein Absorbermaterial mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit als PEEK-HPV wahrscheinlich eine geringere Verbesserung der Gesamtausdehnung zur Folge haben wird als ein entsprechendes

---

**Tabelle 4.1. (gegenüberliegende Seite):** Kriterienkatalog zur Bewertung der einzelnen Sensorelemente.

Reproduzierbarkeit: Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, Empfindlichkeit: Empfindlichkeit des Sensors mit der jeweiligen Ausleseeinheit, Verfügbarkeit: Verfügbarkeit der Ausleseeinheit in ausreichender Menge, Wiederverwendbar: Wiederverwendbarkeit der Ausleseeinheit in anderen Sensorkonfigurationen, Kosten: Kosten des Auslesesystems, Kompatibilität: Kompatibilität der Ausleseeinheit mit dem bestehenden DAQ-System, Stabilität: Mechanische Stabilität des Absorbers, Fluid messbar: Einfluss des Fluids messbar, Beschichtung: Verbesserung der Antwortamplitude durch Grafitbeschichtung, Nutzbarkeit: Fluid erzeugt konstantes Signal über die Messzeit, Kompatibilität: Kunststoff-/Kleber kompatibel, Toxizität: Giftigkeit des Fluids, zus. Absorber: Einbringung eines zusätzlichen Absorbers.

++  $\hat{=}$  sehr gut, +  $\hat{=}$  gut, o  $\hat{=}$  ausreichend, -  $\hat{=}$  schlecht, --  $\hat{=}$  sehr schlecht.

Ausleseeinheit	Weg- aufnehmer		Elektret- Mikrofon		FZ- caesar		
Reproduzierbarkeit	+		o		-		
Empfindlichkeit	+		o		-		
<i>NEP''</i>	+		o		o		
Verfügbarkeit	+		+		-		
Wiederverwendbar	+		o		-		
Kosten	-		+		?		
Kompatibilität	+		+		-		
Absorbermaterial	PVC	PE	CFRP	Kupfer	Full- Cure720	PEEK- HPV	IR-trans. Fenster
Stabilität	+	+	-	++	+	+	+
Empfindlichkeit	+	++	o	-	++	o	o
Reproduzierbarkeit	+	-		+	o	+	+
<i>NEP''</i>	+	++	o	--	o	+	-
Fluid messbar	-	-		+	-	+	+
Beschichtung	-	-		++	-	-	+
Fluid	Wasser	Silikon- öl	Novec- 7100	GWG-50	Luft	verw. Absorber	
Nutzbarkeit	+	+	-	+	+	PVC	
Reproduzierbarkeit	+	o	-	+	+	PEEK-HPV	
Empfindlichkeit	+	+		-	-	"	
<i>NEP''</i>	+	+		++	-	"	
Reproduzierbarkeit	+	o		+	+	IR-trans. Fenster	
Empfindlichkeit	o	+		-	+	"	
<i>NEP''</i>	-	-		--	+	"	
zus. Absorber	-				++	"	
Kompatibilität	+	+	+	+	+		
Toxizität	-	-	-	-	-		



Material mit einer kleineren Wärmekapazität.

Die Messungen mit Absorbern aus PEEK-HPV, bei dessen Verwendung ein positiver Einfluss des Fluids auf die Messergebnisse gezeigt werden konnte, zeigen deutlich, dass die Reduzierung der Absorberdicke auch in der Praxis zu einer deutlichen Verbesserung des Sensorsignals führt (siehe Kapitel 3.3.5.2). Dies ist auf den stärkeren Einfluss des Fluids zurückzuführen, das einen deutlich größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat als das PEEK-HPV. Aus diesem Grund wurde PEEK-HPV als Absorbermaterial für die Experimente zur Evaluation des Einflusses von verschiedenen Fluiden in der Druckkammer auf die Messergebnisse genutzt.

Versuche mit verschiedenen Fluiden in der Druckkammer eines Sensors mit PEEK-HPV-Absorber haben gezeigt, dass der Wärmeübergang vom Absorber auf das Fluid von zentraler Bedeutung ist. Bei einem kleinen Wärmeübergangskoeffizienten kommt es zu einer geringeren Erwärmung des Fluids, was in einer ebenfalls geringeren Gesamtausdehnung des Sensors resultiert.

Ein Vergleich der kalkulierten Wärmeübergangskoeffizienten für die genutzten Fluide ergab, dass dieser für Wasser am größten und etwa viermal größer ist als der des verwendeten Silikonöls. Dies kompensiert den etwa viermal größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Silikonöls nahezu vollständig. Durch Experimente konnte bestätigt werden, dass Wasser und Silikonöl nahezu gleich große Sensorantworten generieren (siehe Kapitel 3.4.2.1).

Wird der Sensor mit einem IR-transmissiven Fenster genutzt, kommt es zu einer Wärmeentwicklung direkt im Fluid in der Druckkammer des Sensors. Hierdurch wird die Notwendigkeit eines hohen Wärmeübergangskoeffizienten des Fluids eliminiert und ein niedriger Wärmeübergangskoeffizient sollte in dieser Konstellation einen schnellen Wärmeverlust über das IR-transmissive Fenster verhindern. Dies lässt sich beispielsweise an den Ergebnissen aus Abschnitt 3.4.3 nachvollziehen. Hier zeigte Wasser eine nur etwa halb so große Sensorantwort wie Silikonöl, dessen Wärmeübergangskoeffizient viermal kleiner ist.

Zudem zeigt sich, dass Flüssigkeiten mit einer besonders hohen Absorption aufgrund der dadurch bedingten dünnen erwärmten Grenzfläche direkt am IR-transmissiven Fenster die Wärme offensichtlich schnell wieder über das kühle Fenster an die Umwelt abgeben (siehe den Versuch mit durch Tinte geschwärztem Wasser in Abschnitt 3.3.2.2). Eine erhöhte Transmission kann also von Vorteil sein, solange die Strahlung noch vollständig vom Fluid absorbiert wird. Ein ähnlicher Effekt ist auch bei der Absorption durch Feststoffabsorber zu erwarten, da auch hier eine dünne erwärmte Grenzschicht eine Wärmeabgabe an die umgebende Luft begünstigen kann. Dass eine erhöhte Transmission eines fluidischen Absorbers nur zu einer Verbesserung der Sensorantworten führt solange die Strahlung dennoch vollständig absorbiert wird, ist

in Abschnitt 3.4.3 deutlich anhand von Luft und Silikon in einer Sensorkonfiguration mit IR-transmissivem Fenster zu erkennen. Sowohl Luft als auch Silikonöl haben eine Transmissivität von über 80% im für den Versuch relevanten Wellenlängenbereich von etwa  $3 - 5 \mu m$  (siehe (Budzier et al., 2007) und (Chalmers et al., 2012)), die vermessene Schichtdicke von Luft beträgt allerdings mehrere Meter, während es sich bei Silikonöl um einige Mikrometer handelt. Luft absorbiert in der in den Versuchen genutzten Dicke der Druckkammer von  $9 mm$  also so gut wie gar keine IR-Strahlung. Dies zeigt sich auch deutlich in der Untersuchung der Golayzellenkonfiguration des Sensors in Abschnitt 3.4.4. Hier führt das Einbringen eines zusätzlichen Absorbers in die Sensorkammer zu einer erheblichen Vergrößerung der Sensorantworten. Die Erwärmung der Luft, die zu den Sensorantworten ohne zusätzliche Absorber führt, resultiert wahrscheinlich aus einer Absorption der Strahlung durch den Boden der Sensorkammer und einer konduktiven Erwärmung der Luft.

Im Falle der durchgeführten Messungen mit einem Sensor in Golayzellenkonfiguration führte das Einbringen von zusätzlichen Absorbern in die Druckkammer zu einer deutlichen Vergrößerung des Rauschens. Dies führte zu erhöhten  $NEP''$ -Werten, die größer waren als die der Messungen mit PEEK-HPV-Absorbern. Da das Rauschen in den Messungen in Abschnitt 3.4.3 mit einem Sensor mit IR-transmissivem Fenster und Luft als Sensorfüllung ohne zusätzlichen Absorber um 75% kleiner war als das Rauschen des Sensors in gleicher Konfiguration in Abschnitt 3.4.4, ist dies wohl keine Grundeigenschaft der Golayzellenkonfiguration, sondern wird durch die in Abschnitt 3.4.4 modifizierten Versuchsbedingungen, wie beispielsweise einer anderen Sensorbasis, verursacht.

## 4.2. Optimierungspotential des technischen Sensors

Die Messungen haben gezeigt, dass es Möglichkeiten gibt den technischen Sensor zu verbessern. Hierzu bieten sich die Nutzung einer noch empfindlicheren Ausleseinheit und/oder eine Optimierung der Stärke der Membranauslenkung an.

Für die Optimierung der Membranauslenkung kann an vielen Stellen angesetzt werden. So würde eine Membran in Frage kommen, die der Auslenkung weniger Widerstand entgegensetzt, oder auch eine Verbesserung anderer Sensorkomponenten wie des Absorbers und des Sensorfluids.

Dass eine Reduzierung der Absorberschichtdicke beim PEEK-HPV zu einer erheblichen Steigerung der Sensorantwort führt, konnte durch Messungen und Simulationen gezeigt werden (siehe Abschnitte 3.3.5.2 und 3.3.6). Auch ein Material mit niedrigerer Wärmekapazität oder Dichte mit ansonsten gleichbleibenden Materialeigenschaften

ten würde, begrenzt durch die endliche Flexibilität der Membran, zu einer weiteren Erhöhung der Gesamtausdehnung des Systems und somit zu größeren Sensorantworten führen. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit hingegen würde zu einer stärkeren Verteilung der Wärme im Absorber führen und so mit steigenden Werten in immer geringerem Maße zu einer Erhöhung der Gesamtausdehnung führen. Um eine weitere Verbesserung zu erzielen, könnte ein Sensorfluid mit besserem Verhältnis zwischen Wärmeübergangskoeffizienten und thermischen Ausdehnungskoeffizienten genutzt werden. Im Rahmen der Recherchen dieser Arbeit konnte jedoch kein besser geeignetes Fluid als Wasser gefunden werden.

Sollte weiterhin ein IR-transmissives Fenster genutzt werden, muss bei der Auswahl der Flüssigkeiten auf eine auf die Druckkammertiefe abgestimmte Transmissivität, einen geringen Wärmeübergangskoeffizienten und einen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten geachtet werden. Ob hierdurch bessere Ergebnisse als mit einem luftgefüllten Sensor mit zusätzlichem Absorber, also einer Golayzelle möglich sind, ist jedoch fraglich, da diese alle drei beschriebenen Kriterien bereits sehr gut erfüllt. Ob mit dem Sensor mit flüssigkeitsgefüllter Sensorkammer theoretisch so hohe Empfindlichkeiten wie sie das biologische Modell erreicht möglich sind, kann aufgrund der hier durchgeführten Versuche nicht eindeutig bestätigt werden. In den Experimenten dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass selbst einfache Optimierungen hin zu einer Golayzelle ausreichen um die Empfindlichkeit des Sensors deutlich über die eines fluidgefüllten Sensors steigen zu lassen. Möglicherweise benutzt der Käfer neben dem bekannten photomechanischen Prinzip mit mechanisch aktivem Fluid noch weitere bisher unbekannte Effekte um die Sensitivität der IR-sensitiven Sensillen zu erhöhen. Ein Schlüsselfaktor für eine Verbesserung des Sensors ist die Miniaturisierung. Durch diese können nicht nur dünnere Absorberdicken genutzt werden, auch die thermische Masse des Sensors würde minimiert, was zu einem schnelleren Antwortverhalten führen würde.

### 4.3. Was kann man daraus für das biologische Modell ableiten?

In einem Reverse-Bionik-Ansatz sollen folgend die mit dem bionischen Sensor ermittelten Ergebnisse auf das biologische Modell übertragen werden. Reverse-Bionik bezeichnet den Prozess eines Wissenstransfers aus den Erkenntnissen, die durch bionische Entwicklungen gewonnen wurden, auf das biologische Vorbild (Speck and Erb, 2011). Dies führt zu einem Wissenszuwachs über das biologische Vorbild, aus dem wiederum neue Ansätze für einen verbessertes bionisches Modell resultieren können.

Anhand der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über das thermische Zusammenspiel der Komponenten des technischen Sensors sollen bisher nicht im Detail verstandene Eigenschaften des Käfersensillums diskutiert werden.

Aufgrund der Größe des Käfersensillums und der durch Schmitz et al. (2007) beschriebenen Eindringtiefe der IR-Strahlung von bis zu  $6 \mu\text{m}$  ist das Sensillum wahrscheinlich als eine Art „Hybrid“ zwischen den beiden in dieser Dissertation untersuchten Sensorkonfigurationen mit Feststoff- bzw. Fluidabsorber zu sehen. Für den Austausch der Wärme zwischen Fluid und der Kutikula gelten die gleichen Kriterien und Prinzipien wie auch für den technischen Sensor.

Ob die Wärme in der Mesokutikula oder direkt im Fluid entsteht, macht vermutlich aufgrund der speziell angepassten Materialwerte der Mesokutikula nur einen geringen Unterschied. Wie in der Einleitung in Tabelle 1.3 berechnet ist der thermische Ausdehnungskoeffizient der Mesokutikula mit  $1.22 \cdot 10^{-4} [1/K]$  nahezu so groß wie der thermischen Ausdehnungskoeffizient von Wasser mit  $2.1 \cdot 10^{-4} [1/K]$ . Wird die Strahlung primär vom Fluid absorbiert und an die Mesokutikula abgegeben, ist der Verlust an Gesamtausdehnung also deutlich minimiert.

Wird die Strahlung jedoch primär von der Mesokutikula absorbiert, würde es aufgrund eines hohen Wärmeübergangskoeffizienten des Fluids im Sensillum zu einer schnellen Erwärmung von diesem kommen. Da im Sensillum höchstwahrscheinlich wässrige Lösungen vorhanden sind (Schmitz et al., 2007), wird der hohe Wärmeübergangskoeffizient des Wassers für eine schnelle Wärmeübertragung sorgen. Aufgrund der äußerst kleinvolumigen und fein verteilten Fluidvorkommen im Sensillum könnte die Verteilung der Wärme im Sensor optimiert sein.

Bei einer Absorption der IR-Strahlung könnten im Fluid gelöste Substanzen die Absorption des Fluids zwar erhöhen, jedoch den Wärmeübergangskoeffizienten herabsetzen. Im Falle des technischen Sensors würde dies einer Konfiguration mit einem IR-transmissiven Fenster und einem Glycerol-Wasser-Gemisch als Absorbermedium entsprechen. Die bessere Absorption durch im Fluid enthaltene Stoffe dürfte im Sensillum aufgrund der sehr kleinen Fluidvolumina in den Mikrolakunen, anders als im Sensor, vorteilhaft sein. Zudem könnte durch die Zusätze nicht nur der Grad der Absorption, sondern auch die Bandbreite der absorbierten Wellenlängen verbessert werden (Müller, 2009). Bei einer Primärabsorption durch das Wasser würde das Herabsetzen des Wärmeübergangskoeffizienten eine Abgabe der Wärme an die Mesokutikula erschweren und die Wärme im Fluid halten. Die im Fluid enthaltenen Substanzen könnten hier zudem den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der wässrigen Lösung noch zusätzlich erhöhen. Sollte ein Großteil der Wärme jedoch von der Mesokutikula absorbiert werden wäre ein Fluid mit einem möglichst hohen Wärmeübergangskoeffizienten vorteilhaft. Hierdurch würde mehr Wärme in das Fluid überführt, das einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als die Mesokutikula hat.

Während der Recherchen für diese Dissertation war es nicht möglich ein Fluid mit einem höheren Wärmeübergangskoeffizienten als reinem Wasser zu finden. Die nicht-wässrigen Bestandteile der Lösung im Sensillum wären demnach nur von Vorteil, wenn die Reduktion des Wärmeübergangskoeffizienten von der durch die im Fluid gelösten Substanzen vergrößerten thermischen Ausdehnung mehr als kompensiert wird (vgl. Abschnitt 3.21). Da im IR-Organ von *Melanophila* aufgrund der sehr geringen Größe der Sensillen wahrscheinlich sowohl die Mesokutikula als auch das Fluid absorbieren, kann in diesem Fall zwischen den beiden Szenarien nicht genau getrennt werden.

Aufgrund der bereits von Müller (2009) berechneten geringen Wärmeleitfähigkeit des Mantels könnte dieser als Isolator dienen, der einen Austrag der Wärme aus dem Sensillum verlangsamt. Aufgrund der geringen Größe und thermischen Masse des Sensillums ist die thermische Trägheit des Systems entsprechend gering. Temperaturänderungen werden also sehr schnell wieder ausgeglichen, so dass eine zusätzliche Isolation möglicherweise Vorteile bringen könnte. Die in Müller (2009) berechneten Werte der Wärmeleitfähigkeit sind allerdings nur grobe Näherungen, sodass der Grad der Isolierung nicht genau bekannt ist. Die in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.5.6 beschriebene Verbesserung der Sensorantwort bei einer Beschichtung des IR-transmissiven Fensters könnte diesen Isolierungseffekt möglicherweise ebenfalls abbilden; die Ursache für die Verbesserung konnte aber nicht zweifelsfrei geklärt werden. Ein möglicher positiver Effekt durch eine thermische Isolierung des Fensters kann daher lediglich als Hypothese formuliert werden.

Auch die durch Müller, 2009 beschriebene Kontraktion des Mantels und damit einhergehende Reduktion des Druckkammervolumens konnte hier getestet werden. Müller diskutiert eine Kontraktion des Mantels durch einen möglichen negativen Ausdehnungskoeffizienten der Chitinfasern im Mantel des Sensillums, die den Kern zusammenpressen und so zu einer weiteren Druckzunahme führen. In den Experimenten mit dem technischen Sensor konnte gezeigt werden, dass Materialien mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu einer stärkeren Auslenkung der Membran führen. Dieser Effekt kann durch sich auch nach innen ausdehnende Absorber erklärt werden, die das Volumen der Druckkammer so verringern. Bei den Absorbieren mit einem geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zeigte sich dieser Effekt nicht so deutlich.

Ein negativer Ausdehnungskoeffizient würde im Falle des technischen Sensors durch ein Zusammenziehen des Absorbers eher zu einer Vergrößerung des Druckkammervolumens führen. Festzuhalten bleibt, dass eine Reduzierung des Druckkammervolumens im technischen Sensor zu deutlichen Sensorantworten, auch ohne eine eindeutige Ausdehnung des Fluids, geführt hat. Dieser Effekt dürfte im Sensillum mit einem sich ausdehnenden fluidischen Kern noch deutlich größer ausfallen.

### 4.4. Ausblick

Wie in Abschnitt 4.2 bereits beschrieben reichen die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse nicht aus, um eine finale Aussage über die maximal mögliche Empfindlichkeit eines photomechanischen IR-Sensors zu treffen. Aus der Lage der Sensillen am Käferkörper lässt sich jedoch eine neue, ergänzende und bisher noch nicht beschriebene mögliche Funktionsweise der Käfersensillen herleiten, die die Sensitivität erheblich steigern könnte:

Durch die Lage der Sensillen direkt unterhalb des zum Flug genutzten zweiten Flügelpaares stellt sich die Frage, wie die bimodalen IR-Sensillen (Schmitz and Bleckmann, 1998), die sowohl auf mechanische Reize als auch eine IR-Absorption reagieren, in dieser mechanisch sehr aktiven Gegend am Käferkörper störungsfrei funktionieren können. Aus diesem scheinbaren Widerspruch lässt sich jedoch auch eine erweiterte Funktionsweise der IR-Sensillen ableiten:

Da die Grubenorgane von *Melanophila acuminata* in direkter Nähe des thorakalen Flugmotors liegen, kommt es beim Flug vermutlich zu Vibrationen der Ventriten, auf denen die Grubenorgane liegen. Diese Vibrationen versetzen wahrscheinlich auch die mit kleinen Stielchen an der äußeren Kutikulakuppel befestigten Kugeln (bestehend aus einem exokutikulären Mantel und einem mikrofluidischen Kern aus poröser Mesokutikula) in eine Schwingung, die der Flügelschlagfrequenz (ca. 100 Hz) entspricht. Ein Schwingen der Kugeln würde vermutlich zu einer Erregung der mechanosensitiven Nervenzellen führen, die die Sensillen innervieren.

Da die Sensillen in Größe und Form eine leichte Variation zeigen, werden die Vibrationen zu unterschiedlich starken Schwingungen der einzelnen Kugeln führen und so die Rezeptorpotentiale der mechanosensitiven Zellen, die die Sensillen innervieren, unterschiedlich stark anheben. Durch eine sensorische Rückkopplung könnte der Käfer die Stärke der Kugelvibration und somit auch die Anzahl der Sensillen, die bereits ohne zusätzliche IR-Absorption Aktionspotentiale generieren, auf einen bestimmten Wert einstellen. Das um den exokutikulären Mantel der Kugel herum gelegene Fluid könnte für eine ausreichende Dämpfung sorgen, die verhindert, dass es zu Interferenzen zwischen den Schwingungspulsen kommt und das System so stabilisieren.

Während eines Suchfluges könnte der Käfer die Intensität der Kugelvibration so einstellen, dass auf jeder Körperseite nur wenige Sensillen bereits Aktionspotentiale generieren. Ein weiteres Kontingent an Sensillen befände sich - bedingt durch Variationen in Form und Größe - durch die Vibrationen mit seinem Generatorpotential bereits knapp unterhalb der Schwelle für die Auslösung eines Aktionspotentiales.

Bei diesen Sensillen könnten bereits kleinste Ausdehnungsereignisse, die durch die Absorption von IR-Strahlung entstehen (photomechanisches Prinzip), die Nervenzellen überschwellig erregen und so zu einer Signalgenerierung führen, die

der Käfer dann unmittelbar einer IR-Exposition zuordnen kann. Durch einen Vergleich der Anzahl der aktiven Sensillen im linken und rechten Grubenorgan könnte der Käfer die Richtung bestimmen, in der sich die potentielle IR-Quelle befindet. Auf diese Weise wäre der Betrag der IR-Energie, die benötigt wird um ein Sensillum überschwellig zu erregen, wahrscheinlich erheblich verringert. Um diese Theorie zu überprüfen wären morphologische Untersuchungen auf mögliche strukturelle Anpassungen der Ventriten durchzuführen, auf denen die Grubenorgane liegen. Zudem müssen in elektrophysiologischen Experimenten, in denen die durch den Flug verursachten Vibrationen simuliert werden, die Einflüsse von Vibrationen der IR-Sensillen auf die Sensitivität untersucht werden.

Eine mögliche Anwendung der IR-Sensoren nach dem Vorbild von *Melanophila acuminata* wären (teil-)autonome Drohnen zur großräumigen Überwachung von Waldflächen und Früherkennung von Waldbränden. Drohnen könnten große Flächen überwachen, indem sie aufsteigen, mit optischen- und IR-Kameras nach auffälligen Wolken-/Rauchformationen am Horizont suchen und einen Waldbrand schließlich durch die zusätzliche Existenz einer IR-Emissionszone an der Basis einer potentiellen Rauchwolke verifizieren bevor sie einen Brand melden. Die durch die Vibrationen der Rotoren verursachten Schwingungen könnten womöglich für eine Verstärkung des IR-Signals nach *Melanophila*-Vorbild genutzt werden.

# Literaturverzeichnis

- 3M Deutschland GmbH, Oktober 2014. 3M Novec-7100 High-Tech-Flüssigkeit.  
URL [http://multimedia.3m.com/mws/media/6043970/3mtm-novectm-7100-engineered-fluid.pdf?fn=Novec%207100\\_Datenblatt\\_052014.pdf](http://multimedia.3m.com/mws/media/6043970/3mtm-novectm-7100-engineered-fluid.pdf?fn=Novec%207100_Datenblatt_052014.pdf)
- Apel, K., 1988. Befallsverteilung von *Melanophila acuminata* DEG., *Phaenops cyanea* F. und *Ph. formaneki* JACOB. (Col., Buprestidae) auf Waldbrandflächen. Beitr. Forstwirtschaft 22, 45–48.
- Apel, K., 1989. Zur Verbreitung von *Melanophila acuminata* DEG. (Col., Buprestidae). Entomol Nach Ber 33, 278–280.
- Apel, K., 1991. Die Kiefernprachtkäfer. Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde. Merkblatt Nr. 50.
- Arenz, R., 2005. Relation of elastic modulus to thermal expansion coefficient in elastic and viscoelastic materials. In: SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics. pp. 1–4.
- Ashby, M. F., 2013. Materials and the environment: eco-informed material choice, 2nd Edition. Elsevier, Oxford, UK.
- Auer Kunststofftechnik GmbH & Co, KG, Oktober 2014. PE 300.  
URL <http://auer-kunststoff.de/pdf/Technisch.Datenblatt%20PE%20300%20natur%2070093.pdf>
- Baldrige, A. M., Hook, S., C.I., G., Rivera, G., 2009. The ASTER Spectral Library Version 2.0. Remote Sensing of Environment 113, 711–715.
- Barrett, R., Maderson, P., Meszler, R. M., 1970a. The pit organs of snakes. Biology of the Reptilia 2 (4), 277–300.
- Barrett, R., Maderson, P., Meszler, R. M., 1970b. The pit organs of snakes. In: Gans, C. (Ed.), Biology of the Reptilia. Vol. 2. Academic Press, London, pp. 277–314.



- Barth, F. G., Nímeth, S. S., Friedrich, O. C., 2004. Structure and mechanics of the basal part of a spider tactile hair. *Journal of Comparative Physiology A* 190 (7), 523–530.
- Baum, M., 2014. Römpp Chemie Lexikon online. Georg-Thieme-Verlag.
- Bellamy, C. L., 2008. A world catalogue and bibliography of the jewel beetles (Coleoptera: Buprestoidea). Volume 3: Buprestinae: Pterobothrini through Agrilinae: Rhaeboscelina. Pensoft, Sofia-Moscow.
- Budzier, H., Gerlach, G., 2010. Thermische Infrarotsensoren: Grundlagen für Anwender. Wiley-VCH.
- Budzier, H., Krause, V., Gerlach, G., Wassiliew, D., 2007. MWIR-Wärmebildkamera mit Mikrobolometer (Microbolometer-based MWIR Infrared Camera). *tm-Technisches Messen* 74 (09), 450–455.
- Bullock, T. H., Diecke, F., 1956. Properties of an infrared receptor. *The Journal of physiology* 134 (1), 47–87.
- Buning, T. D. C., 1985. Qualitative and quantitative explanation of the forms of heat sensitive organs in snakes. In: *Architecture in Living Structure*. Springer, pp. 87–99.
- Campbell, A. L., Naik, R. R., Sowards, L., Stone, M. O., 2002. Biological infrared imaging and sensing. *Micron* 33 (2), 211–225.
- Carvill, J., 1994. Mechanical engineer's data handbook. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Caterina, M. J., Schumacher, M. A., Tominaga, M., Rosen, T. A., Levine, J. D., Julius, D., 1997. The capsaicin receptor: a heat-activated ion channel in the pain pathway. *Nature* 389 (6653), 816–824.
- Chalmers, J. M., Edwards, H. G. M., Hargreaves, M. D., 2012. Infrared and raman spectroscopy in forensic science. John Wiley & Sons, Ltd.
- Cristancho, D. M., Delgado, D. R., Martínez, F., Abolghassemi Fakhree, M. A., Jouyban, A., 2011. Volumetric properties of glycerol+ water mixtures at several temperatures and correlation with the Jouyban-Acree model. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas* 40 (1), 92–115.
- Dereniak, E., Boreman, G., 1996. Infrared detectors and systems. Wiley.
- Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., März 2014. Kupfer-ETP.  
URL [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/pdf/Cu-ETP.pdf](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/pdf/Cu-ETP.pdf)

- DIAS Infrared GmbH, November 2014a. Pyroelektrische Infrarotsensoren PYROSENS datasheet.  
URL [http://www.dias-infrared.de/pdf/pyrosens\\_ger\\_mail.pdf](http://www.dias-infrared.de/pdf/pyrosens_ger_mail.pdf)
- DIAS Infrared GmbH, November 2014b. PYROVIEW 640L datasheet.  
URL [http://www.dias-infrared.de/pdf/pyroview640l\\_ger\\_mail.pdf](http://www.dias-infrared.de/pdf/pyroview640l_ger_mail.pdf)
- Dixon, J., 2007. The shock absorber handbook, second edition. John Wiley & Sons.
- Evans, W., 1966. Perception of infrared radiation from forest fires by *Melanophila acuminata* De Geer (Buprestidae, Coleoptera). *Ecology*, 1061–1065.
- Evans, W., 2010. Reproductive role of infrared radiation sensors of *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae) at forest fires. *Annals of the Entomological Society of America* 103 (6), 823–826.
- Evans, W. G., 1964. Infrared receptors in *Melanophila acuminata* DeGeer. *Nature* 202 (4928), 211–211, 10.1038/202211a0.
- Fabritius, H.-O., Sachs, C., Triguero, P. R., Raabe, D., 2009. Influence of structural principles on the mechanics of a biological fiber-based composite material with hierarchical organization: the exoskeleton of the lobster *Homarus americanus*. *Advanced Materials* 21 (4), 391–400.
- Golay, M., 1947. Theoretical consideration in heat and infra-red detection, with particular reference to the pneumatic detector. *Review of Scientific Instruments* 18 (5), 347–356.
- Grace, M. S., Church, D. R., Kelly, C. T., Lynn, W. F., Cooper, T. M., 1999. The *Python* pit organ: imaging and immunocytochemical analysis of an extremely sensitive natural infrared detector. *Biosensors and Bioelectronics* 14 (1), 53–59.
- Gracheva, E. O., Cordero-Morales, J. F., Gonzalez-Carcacia, J. A., Ingolia, N. T., Manno, C., Aranguren, C. I., Weissman, J. S., Julius, D., 2011. Ganglion-specific splicing of TRPV1 underlies infrared sensation in vampire bats. *Nature* 476 (7358), 88–91, 10.1038/nature10245.
- Gracheva, E. O., Ingolia, N. T., Kelly, Y. M., Cordero-Morales, J. F., Hollopeter, G., Chesler, A. T., Sanchez, E. E., Perez, J. C., Weissman, J. S., Julius, D., 2010. Molecular basis of infrared detection by snakes. *Nature* 464 (7291), 1006–1011, 10.1038/nature08943.
- Graham, S., 1939. Principles of forest entomology. Vol. 2nd edition. McGraw-Hill Publishing Company, Ltd.

## Literaturverzeichnis

---

- Gronenberg, W., Schmitz, H., 1999. Afferent projections of infrared-sensitive sensilla in the beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae). *Cell and Tissue Research* 297 (2), 311–318.
- Hammer, D., Schmitz, H., Schmitz, A., Grady Rylanderiii, H., Welch, A., 2001. Sensitivity threshold and response characteristics of infrared detection in the beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae). *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology* 128 (4), 805–819.
- Heimann Sensor GmbH, November 2014a. HMS series datasheet.  
URL [http://www.heimansensor.com/Datasheet-2b-T018\\_rev2.pdf](http://www.heimansensor.com/Datasheet-2b-T018_rev2.pdf)
- Heimann Sensor GmbH, November 2014b. HTPA 82x62 IR array module for thermal imaging datasheet.  
URL [http://www.heimansensor.com/Datasheet-HTPA%2082x62\\_R1.pdf](http://www.heimansensor.com/Datasheet-HTPA%2082x62_R1.pdf)
- Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG, Oktober 2014. Herasil.  
URL [http://heraeus-quarzglas.de/media/webmedia\\_local/downloads/broschren\\_mo/DatenundEigenschaften\\_QuarzglasfuerdieOptik.pdf](http://heraeus-quarzglas.de/media/webmedia_local/downloads/broschren_mo/DatenundEigenschaften_QuarzglasfuerdieOptik.pdf)
- Hesse, M., Meier, H., Zeeh, B., 2005. *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*, 7. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- InfraTec GmbH, November 2014. VarioCAM high definition datasheet.  
URL [http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/VC\\_HD/VarioCAM\\_HD\\_A4\\_de\\_mail.pdf](http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/VC_HD/VarioCAM_HD_A4_de_mail.pdf)
- Jurima Dichtungen GmbH, März 2014. PVC-U.  
URL <http://www.jurima-gmbh.de/uploads/media/pvc-u.pdf>
- Kahl, T., Bousack, H., Schneider, E. S., Schmitz, H., 2014. Infrared receptors of pyrophilous jewel beetles as model for new infrared sensors. *Sensor Review* 34 (1), 123–134.
- Kishida, R., Goris, R. C., Terashima, S.-I., Dubbeldam, J. L., 1984. A suspected infrared-recipient nucleus in the brainstem of the vampire bat, *Desmodus rotundus*. *Brain Research* 322 (2), 351–355.
- Klocke, D., 2012. *Materialwissenschaftliche und strukturelle Untersuchungen an photomechanischen Infrarotrezeptoren bei Insekten zur Optimierung neuartiger technischer Infrarotsensoren*. Dissertation an der Universität Bonn.

- Klocke, D., Schmitz, A., Soltner, H., Bousack, H., Schmitz, H., 2011. Infrared receptors in pyrophilous („fire loving“) insects as model for new un-cooled infrared sensors. *Beilstein Journal of Nanotechnology* 2 (1), 186–197.
- Klocke, D., Schmitz, H., 2012. Material properties of photomechanical infrared receptors in pyrophilous *Melanophila* beetles and *Aradus bugs*. *Acta Biomaterialia* 8 (9), 3392–3399.
- Kreiss, E., Schmitz, A., Schmitz, H., 2005. Morphology of the prothoracic discs and associated sensilla of *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *Arthropod Structure & Development* 34 (4), 419–428.
- Kreiss, E., Schmitz, H., Gebhardt, M., 2007. Electrophysiological characterisation of the infrared organ of the Australian „little ash beetle“ *Acanthocnemus nigricans* (Coleoptera, Acanthocnemidae). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 193 (7), 729–739.
- Krenkel, W., 2009. *Verbundwerkstoffe: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. John Wiley & Sons.
- Kürten, L., Schmidt, U., 1982. Thermoperception in the common vampire bat (*Desmodus rotundus*). *Journal of comparative physiology* 146 (2), 223–228.
- Lang, W., KTühl, K., Sandmaier, H., 1992. Absorbing layers for thermal infrared detectors. *Sensors and Actuators A: Physical* 34 (3), 243–248.
- Lee, Y.-S., 2009. *Principles of terahertz science and technology*. Springer-Verlag.
- Lide, D., 2003. *CRC handbook of chemistry and physics*. crc handbook of chemistry and physics. CRC Press.
- Linsley, G., 1943. Attraction of *Melanophila* beetles by fire and smoke. *Journal of Economic Entomology* 36 (2), 341–342.
- Mainz, T., Schmitz, A., Schmitz, H., 2004. Variation in number and differentiation of the abdominal infrared receptors in the Australian “fire-beetle“ *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae). *Arthropod Structure & Development* 33 (4), 419–430.
- Martienssen, W., Warlimont, H., 2005. *Springer handbook of condensed matter and materials data*. Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, Edited by W. Martienssen and H. Warlimont. 2005 XVIII, 1120 p. 1025 illus. With CD-ROM. 3-540-44376-2. Berlin: Springer, 2005. 1.
- Mellouki, I., Bennaji, N., Yacoubi, N., 2007. IR characterization of graphite black-coating for cryogenic detectors. *Infrared physics & technology* 50 (1), 58–62.

## Literaturverzeichnis

---

- Moreno, M., Torres, A., Ambrosio, R., Kosarev, A., 2012. Un-Cooled microbolometers with amorphous germanium-silicon( $a - Ge_xSi_y : H$ ) thermo-sensing films. Bolometers, ISBN, 978–953.
- Müller, M., 2009. Aufbau und Materialeigenschaften kutikulärer Gelenkstrukturen und Infrarotrezeptoren bei Insekten und ihre funktionale Bedeutung. Disseration an der Universität Bonn.
- Naval Air Warfare Center, 1997. Electronic warfare and radar systems engineering handbook. Naval Air Warfare Center.
- Newman, E. A., Hartline, P. H., 1982. The infrared „vision“ of snakes. Scientific American 20, 116–127.
- NIST, National Institute of Standarts and Technologie, Februar 2014. Infrared spectrum of glycerine.  
URL <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C56815&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC>
- Oliver, W. C., Pharr, G. M., 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of materials research 7 (06), 1564–1583.
- Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M., Rudolphi, A., 2008. Insulating materials: principles, materials, applications, 1st Edition. Birkhäuser : Ed. Detail, Basel, Switzerland.
- Poulton, E., 1915. The habits of the Australian buprestid “fire-beetle“ *Merimna atrata*, Lap. et Gory. Transactions of the Entomological Society of London pt. 1, proc., iii-iv.
- Quadrant Plastic Composites GmbH, Oktober 2014. Ketron PEEK HPV .  
URL [http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product\\_Data\\_Sheets\\_PDF/AEP/Ketron\\_HPV\\_PEEK\\_PDS\\_D\\_28042011.pdf](http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/AEP/Ketron_HPV_PEEK_PDS_D_28042011.pdf)
- Röchling Sustaplast KG, Oktober 2014. PVC-U technical data sheet.  
URL <http://www.roechling.com/fileadmin/downloads/Roechling%20Sustaplast/Datenblaetter/EN/Datasheet-Trovidur-PVC-U-EN.pdf>
- Rogalski, A., 2003. Infrared detectors: status and trends. Progress in Quantum Electronics 27 (2-3), 59–210.
- Rogalski, A., 2011. Infrared detectors, second edition. CRC Press.

- Rogalski, A., 2012. History of infrared detectors. *Opto-Electronics Review* 20 (3), 279–308.
- Rominger, L., 2003. *Qualitative Kunststoffanalytik: Thermoplaste: leichtverständliche Einführung*. L. Rominger.
- Sagebiel, J. C., Seiber, J. N., 1993. Studies on the occurrence and distribution of wood smoke marker compounds in foggy atmospheres. *Environmental Toxicology and Chemistry* 12 (5), 813–822.
- Schmitz, A., Gebhardt, M., Schmitz, H., 2008. Microfluidic photomechanic infrared receptors in a pyrophilous flat bug. *Naturwissenschaften* 95 (5), 455–460.
- Schmitz, A., Schätzkel, H., Schmitz, H., 2010. Distribution and functional morphology of photomechanic infrared sensilla in flat bugs of the genus *Aradus* (Heteroptera, Aradidae). *Arthropod Structure & Development* 39 (1), 17–25.
- Schmitz, A., Schneider, E. S., Schmitz, H., 2014. Behaviour of the Australian “fire-beetle“ *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae) on burnt areas after bushfires (accepted). *Records of the Western Australian Museum*.
- Schmitz, A., Sehrbrock, A., Schmitz, H., 2007. The analysis of the mechanosensory origin of the infrared sensilla in *Melanophila acuminata* (Coleoptera; Buprestidae) adduces new insight into the transduction mechanism. *Arthropod Structure & Development* 36 (3), 291–303.
- Schmitz, H., Bleckmann, H., 1997. Fine structure and physiology of the infrared receptor of beetles of the genus *Melanophila* (Coleoptera: Buprestidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology* 26 (3-4), 205–215.
- Schmitz, H., Bleckmann, H., 1998. The photomechanic infrared receptor for the detection of forest fires in the beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 182 (5), 647–657.
- Schmitz, H., Bousack, H., 2012. Modelling a historic oil-tank fire allows an estimation of the sensitivity of the infrared receptors in pyrophilous *Melanophila* beetles. *PLoS ONE* 7 (5), e37627.
- Schmitz, H., Mürtz, M., Bleckmann, H., 2000a. Responses of the infrared sensilla of *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae) to monochromatic infrared stimulation. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 186 (6), 543–549.

## Literaturverzeichnis

---

- Schmitz, H., Schmitz, A., Bleckmann, H., 2000b. A new type of infrared organ in the Australian „fire-beetle“ *Merimna atrata* (Coleoptera: Buprestidae). *Naturwissenschaften* 87 (12), 542–545.
- Schmitz, H., Schmitz, A., Bleckmann, H., 2001. Morphology of a thermosensitive multipolar neuron in the infrared organ of *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae). *Arthropod Structure & Development* 30 (2), 99–111.
- Schmitz, H., Schmitz, A., Trenner, S., Bleckmann, H., 2002. A new type of insect infrared organ of low thermal mass. *Naturwissenschaften* 89 (5), 226–229.
- Schmitz, H., Soltner, H., Bousack, H., 2012. Biomimetic infrared sensors based on photomechanical infrared receptors in pyrophilous („fire loving“) insects. *Sensors Journal, IEEE* 12 (2), 281–288.
- Schmitz, H., Trenner, S., 2003. Electrophysiological characterization of the multipolar thermoreceptors in the „fire-beetle“ *Merimna atrata* and comparison with the infrared sensilla of *Melanophila acuminata* (both Coleoptera, Buprestidae). *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 189 (9), 715–722.
- Schmitz, H., Trenner, S., Hofmann, M. H., Bleckmann, H., 2000c. The ability of *Rhodnius prolixus* (Hemiptera; Reduviidae) to approach a thermal source solely by its infrared radiation. *Journal of insect physiology* 46 (5), 745–751.
- Schneider, E. S., Schmitz, H., 2013. Bimodal innervation of the infrared organ of *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae) by thermo- and mechanosensory units. *Arthropod Structure & Development* 42 (2), 135–142.
- Schneider, E. S., Schmitz, H., 2014. Thermomechanical properties of the stimulus transducing cuticle in the infrared organ of *Merimna atrata* (Coleoptera, Buprestidae). *Journal of morphology* 275 (9), 991–1003.
- Schossig, M., Norkus, V., Gerlach, G., 2013. P2-A miniaturized thermopneumatic infrared detector with capacitive read-out circuit. *Proceedings IRS<sup>2</sup> 2013*, 95–99.
- Schott AG, August 2014. Schott Borofloat 33.  
URL <http://www.vdg-ev.org/technik/kataloge/schott/borofloat.pdf>
- Schütz, S., Weissbecker, B., Hummel, H. E., Apel, K.-H., Schmitz, H., Bleckmann, H., 1999. Insect antenna as a smoke detector. *Nature* 398 (6725), 298–299.

- Siebke, G., Gerngroß, K., Holik, P., Schmitz, S., Rohloff, M., Tätzner, S., Steltenkamp, S., 2014a. An uncooled capacitive sensor for IR detection. In: Proc. SPIE. Vol. 9070. pp. 90701W–90701W–10.  
URL <http://dx.doi.org/10.1117/12.2049144>
- Siebke, G., Holik, P., Schmitz, S., Schmitz, H., Lacher, M., Steltenkamp, S., 2014b. A model for  $\mu$ -biomimetic thermal infrared sensors based on the infrared receptors of *Melanophila acuminata*. *Bioinspiration & Biomimetics* 9 (3), 036012.
- Silverstein, R., Bassler, G., 1963. Spectrometric identification of organic compounds. Wiley.
- Sintsov, V., 1966. A study of the properties of gold black. *Journal of Applied Spectroscopy* 4 (6), 362–365.
- Sowards, L. A., Schmitz, H., Tomlin, D. W., Naik, R. R., Stone, M. O., 2001. Characterization of beetle *Melanophila acuminata* (Coleoptera: Buprestidae) infrared pit organs by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry, scanning electron microscope, and Fourier transform-infrared spectroscopy. *Annals of the Entomological Society of America* 94 (5), 686–694.
- Speck, T., Erb, R., 2011. Prozessketten in Natur und Wirtschaft. In: Otto, K.-S., Speck, T. (Eds.), *Darwin meets Business*. Gabler, pp. 95–112.
- Stuart, B., 2005. *Infrared spectroscopy*. John Wiley & Sons, Inc.
- Suter Kunststoffe AG, März 2014. Carbon- (Kohlenstoff-Fasern) Fasertabelle.  
URL <http://www.swiss-composite.ch/pdf/i-Carbon-Fasertabelle.pdf>
- Terashima, S., Goris, R. C., Katsuki, Y., 1968. Generator potential of crotaline snake infrared receptor. *Journal of Neurophysiology* 31, 682–688.
- The Dow Chemical Company, Februar 2014. Discover the origins of some of the world's most consistently pure products ...synthetic glycerine products.  
URL [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_0032/0901b80380032266.pdf?filepath=glycerine/pdfs/noreg/CH131121E.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0032/0901b80380032266.pdf?filepath=glycerine/pdfs/noreg/CH131121E.pdf&fromPage=GetDoc)
- Thurm, U., 1982. Mechano-elektrische Transduktion. In: Hoppe, W., Lohmann, W., Markl, H., Ziegler, H. (Eds.), *Biophysik*. Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 390–396.



## Literaturverzeichnis

---

- TYDEX J.S.Co., November 2014. World Meteorological Organization, global weather & climate extremes archiv.  
URL <http://www.spl-tech.cn/UploadPic/2012/02/22/20120222100435987583.pdf>
- Van Dyke, E., 1926. Buprestid swarming. *The Pan-Pacific Entomologist* 3, 41.
- Verein Deutscher Ingenieure, V.-G. V. u. C., 2006. Wärmeatlas, VDI, 10. Auflage. Springer Verlag.
- Vincent, J., 1990. Fundamentals of infrared detector operation and testing. Wiley.
- Vincent, J. F. V., Wegst, U. G. K., 2004. Design and mechanical properties of insect cuticle. *Arthropod Structure & Development* 33 (3), 187–199.
- Vondran, T., Apel, K., Schmitz, H., 1995. The infrared receptor of *Melanophila acuminata* De Geer (Coleoptera: Buprestidae): ultrastructural study of a unique insect thermoreceptor and its possible descent from a hair mechanoreceptor. *Tissue and Cell* 27 (6), 645–658.
- Wacker Chemie AG, September 2014. RT V Silicon Kautschuke. München, Deutschland.  
URL [http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6019\\_DE\\_1.pdf](http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6019_DE_1.pdf)
- Wacker-Chemie GmbH, Februar 2014. Wacker Siliconöle AK.  
URL <http://www.drawin.de/dasat/images/2/100212-siliconoleak.pdf>
- Wikars, L., 1997. Effects of forest fire and the ecology of fire-adapted insects. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations From the Faculty of Science and Technology (Sweden).
- World Meteorological Organization, 2014. Global weather & climate extremes archiv.  
URL <http://wmo.asu.edu>

# Anhang A.

## Anhang: Tabellen

**Tabelle A.1.:** Auflistung der Perioden- und Expositionsdauer für die Frequenzen von 1 – 15  $Hz$

Frequenz [Hz]	Periodendauer [ms]	Expositionsdauer[ms]
1	1000	500.00
2	500	250.00
3	333.33	166.67
4	250	125.00
5	200	100.00
6	166.66	83.33
7	142.86	71.43
8	125	62.50
9	111.11	55.56
10	100	50.00
11	90.91	45.46
12	83.33	41.67
13	76.92	38.46
14	71.43	35.72
15	66.67	33.34

## Anhang A. Anhang: Tabellen

**Tabelle A.2.:** Gemittelte Amplituden und Varianzen für 6 verschiedene Membrane mit Elektret-Mikrofon-Ausleseeinheit von 1 – 15 *Hz*. Jede Membran wurde acht mal ausgetauscht (N=8)

N=8	Latex 40 $\mu m$		Latex 50 $\mu m$		PE 11 – 14 $mm$	
<b>Frequenz</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>
<b>1</b>	16.97	13.20	16.41	4.83	17.29	12.10
<b>2</b>	18.20	9.43	17.34	5.11	18.57	15.64
<b>3</b>	17.48	4.25	17.06	6.31	16.90	4.91
<b>4</b>	16.87	6.11	16.71	3.52	15.39	2.27
<b>5</b>	16.42	8.33	16.51	5.25	14.47	2.23
<b>6</b>	15.60	9.94	15.87	6.05	13.56	2.99
<b>7</b>	14.66	10.91	15.20	5.75	12.47	3.27
<b>8</b>	13.76	12.26	14.30	5.73	11.47	3.69
<b>9</b>	12.70	10.88	13.36	6.20	10.61	3.66
<b>10</b>	11.84	10.10	12.91	9.47	9.65	4.18
<b>11</b>	10.81	9.92	11.87	8.53	9.01	3.65
<b>12</b>	10.09	9.59	11.11	8.30	8.26	3.37
<b>13</b>	9.33	9.12	9.99	6.61	7.65	2.92
<b>14</b>	8.79	8.96	9.40	6.09	7.12	2.78
<b>15</b>	8.21	8.12	8.81	5.81	6.68	2.44

N=8	PU 25 $\mu m$		PVC 50 $\mu m$		PVC 80 $\mu m$	
<b>Frequenz</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>	$\bar{x}$ <b>Amp</b>	$\bar{x}$ <b>Var</b>
<b>1</b>	16.09	8.38	9.27	7.81	8.27	15.37
<b>2</b>	16.87	3.48	9.96	2.49	9.10	6.17
<b>3</b>	16.91	11.23	10.31	1.62	9.35	2.22
<b>4</b>	16.63	18.73	10.64	2.84	9.61	1.83
<b>5</b>	16.35	25.06	10.64	3.74	9.49	3.09
<b>6</b>	15.81	25.67	10.50	3.94	9.12	3.88
<b>7</b>	14.91	25.46	9.91	4.38	8.62	4.17
<b>8</b>	14.10	26.39	9.41	4.45	8.11	4.55
<b>9</b>	13.14	26.34	8.76	4.01	7.64	4.47
<b>10</b>	12.27	28.38	8.36	4.51	7.32	6.53
<b>11</b>	11.58	25.83	7.74	3.86	6.63	4.59
<b>12</b>	10.85	24.72	7.27	4.00	6.20	4.21
<b>13</b>	10.08	23.82	6.84	3.66	5.81	4.01
<b>14</b>	9.64	21.69	6.47	3.39	5.53	3.79
<b>15</b>	8.95	21.25	6.12	3.49	5.11	3.53

**Tabelle A.3.:** Mediane, Mittelwerte, Varianzen und prozentuale Varianzen der Messergebnisse mit 13 verschiedenen Absorbern auf eine IR-Exposition mit einer Intensität von  $260 \text{ W/m}^2$ . Als Sensorfüllung wurde Wasser verwendet.  
 1-2 PVC 0.5 mm und 1 mm; 3-4 PE 0.5 mm und 1 mm; 5-6 CFRP 0.5 mm und 1 mm; 7-8 PEEK-HPV 0.5 mm und 1 mm; 9-10 PVC 0.5 mm und 1 mm;

Absorber	1	2	3	4	5	6	7
Median [mV]		39.1950	29.0950	62.4450	8.9850	8.5400	17.3000
Mittelwert [mV]	27.8812	38.8523	26.8769	57.0009	8.9021	8.4192	17.2064
Varianz [mV]	1.9489	7.0445	72.8759	157.5563	0.6434	0.6498	0.3355
Varianz [%]	0.5434	2.7370	19.5868	89.8085	0.0573	0.0547	0.0577
Absorber	8	9	10	11	12	13	
Median [mV]	17.4550	2.5150	2.5700	40.9400	48.3350	2.8000	
Mittelwert [mV]	17.4023	2.5249	2.5087	40.5351	48.3059	2.7809	
Varianz [mV]	1.2542	0.0335	0.0931	11.7383	16.4200	0.2450	
Varianz [%]	0.2183	0.0008	0.0023	4.7581	7.9318	0.0068	



**Anhang B.**

**Anhang: Datenblätter**

# Density: FullCure<sup>®</sup> resins

## SOLIDS

Resin	Density, gr/cm <sup>3</sup>
FullCure720	1.189
VeroWhite	1.174
VeroBlue	1.184
VeroGray	1.176
VeroBlack	1.174
TangoGray	1.161
TangoPlus	1.128
TangoBlack	1.128
DurusWhite	1.160
FullCure630	1.135
FullCure655	1.135
FullCure680	1.159



**Abbildung B.1.:** Dichte von FullCure720 (RGD720), Datenblatt vom Hersteller zu Verfügung gestellt.

Abbildung B.2.: Thermische Ausdehnung von FullCure720 (RGD720), Datenblatt vom Hersteller zu Verfügung gestellt.



### 3 Test Results

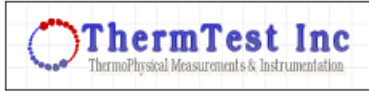
The coefficient of thermal expansion was calculated below and above the glass transition temperature (T<sub>g</sub>) of the tested material. Below and above the T<sub>g</sub>, the thermal expansion coefficient is constant. Within the T<sub>g</sub>, the thermal coefficient is unstable. In other words, thermal expansion is not constant during the transition state.

The following table lists the coefficients of thermal expansion of the Objet materials tested:

Material	Coefficient of thermal expansion measured between:	
	-50°C to T <sub>g</sub>	T <sub>g</sub> <sup>Error! Reference source not found.</sup> to 150°C
VeroGray	73.32 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	194.6 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
VeroWhitePlus		
VeroClear		
VeroDent		
VeroBlackPlus		
FullCure720	76.03 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	193.2 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
VeroBlue	76.03 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	193.2 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
ABS-like <sup>1</sup>	80.0 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	192.0 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
ABS-like <sup>1</sup> (after thermal treatment)	76.0 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	187.0 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
RGD525	63.97 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	176.0 x10 <sup>-6</sup> m/m °C
RGD525 (after thermal treatment)	63.92 x10 <sup>-6</sup> m/m °C	182.4 x10 <sup>-6</sup> m/m °C

1. The values for ABS-like material were obtained by interpolating the measurement results of RGD515 and RGD535.





ThermTest Inc  
2 Garland Court, suite 102  
Fredericton, NB E3B 6C2  
Canada

www.ThermTest.com  
Phone: 506-458-5350  
Fax: 866-274-5269  
E-mail: Info@ThermTest.com

---

## Contract Testing Report for

Objet Geometries Ltd.  
2 Holzman St., Science Park,  
P.O. Box 2496, Rehovot 76124  
Israel

**Contact:** Avi Cohen  
**Date:** 4/7/2008  
**PO#:** na  
**Invoice#:** TTI-2008-26

### Objective

The objective of this testing contract was to measure the thermal conductivity (W/mK) on sample at 25°C.

### Sample

1. Full Cure 720

### Testing Results

Sample	Thermal Conductivity (W/mK)	Standard Deviation (W/mK)	% RSD
Full Cure 720	0.2056	0.0004	0.2399

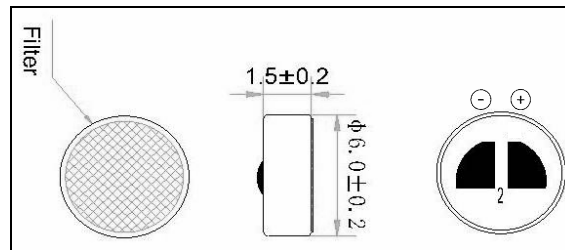
Abbildung B.3.: Wärmeleitfähigkeit von FullCure720 (RGD720), Datenblatt vom Hersteller zu Verfügung gestellt.

**Technical datasheet: KPCM-G60H15C33-44DB-1176**

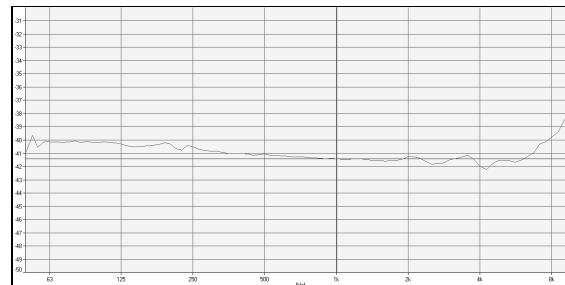
**Specifications:**

Standard operation voltage	2VDC
Max operating voltage	10VDC
Output impedance	2.2kΩ
Frequency	100 Hz to 10,000 Hz
Sensitivity	-44dB±3dB
Sensitivity reduction	-3dB
Max. Current Consumption	0.5mA
Signal to noise ration	60dB
Directivity	Omni-directional

**Dimensions:**



**Frequency Response:**



**Abbildung B.4.:** Datenblatt KPCM G60H15C33-44DB-1176 Elektret-Mikrofon, Firma Kepo Electronic Co., Ltd, Sanchung City, Taipei Hsien, Taiwan



# Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei PD Dr. Helmut Schmitz für die gute Betreuung und die stetige Vermittlung von Zuversicht danken. Ohne die fortwährende Unterstützung und die Aufnahme in das Graduiertenkolleg Bionik und sein Projekt wäre das Erstellen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Bei Prof. Dr. G. von der Emde möchte ich mich für die Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen, bedanken.

Desweiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr. Horst Bleckmann und der gesamten Abteilung für vergleichende Sinnes- und Neurobiologie für die freundliche Aufnahme und die Bereitstellung von Labor und Gerätschaften.

Dr. Herbert Bousack aus dem Forschungszentrum Jülich und Dr. Marco Schossig von der TU Dresden danke ich für die kompetente Beratung in physikalischen und technologischen Fragestellungen.

Bei allen Mitgliedern des Graduiertenkolleg Bionik und ganz besonders bei Dr. Erik Schneider bedanke ich mich für die vielen konstruktiven Diskussionen, die so manches komplexes Problem erhellt haben.

Bei Herr Braun (Institut für Zoologie) und Herr Göddertz (Steinmann-Institut - Paläontologie) bedanke ich mich für das kompetente und schnelle Bearbeiten bzw. Herstellen meiner Sensorbauteile.

Zudem möchte ich allen Freunden danken die hingebungsvoll ihre Zeit geopfert haben, um mich bei der Korrektur dieser Arbeit zu unterstützen.

Für die finanzielle Förderung im Rahmen des Graduiertenkolleg Bionik danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG Graduiertenkolleg 1572).