

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

**Thermomechanische Simulation von Flip-Chip
MEMS-Mikrofonen**

vorgelegt von

Hanna Cornelia Clara Ebbinghaus

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät der Elektrotechnik und
Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Gutachter: Herr Prof. Dr. Walter Hansch
Herr Prof. Dr. Gregor Feiertag

Die Dissertation wurde am 17.12.2020 bei der Universität der Bundeswehr München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
am 16.04.2021 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 31.05.2021 statt

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung und Abstract	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Einleitung	13
1.1. Zielsetzung der Arbeit	14
1.2. Übersicht über die Arbeit.....	15
2. Grundlagen.....	16
2.1. MEMS-Mikrofone.....	16
2.1.1. Aufbau und Funktionsweise von kapazitiven MEMS-Mikrofonen	17
2.1.2. Beschreibung der Geräuscherdrückung	29
2.1.3. Temperaturhysterese bei Flip-Chip MEMS-Mikrofonen	30
2.2. Ausbreitung von Schall.....	32
2.3. Kenngrößen Mikrofon und Messprinzip	33
2.3.1. Kenngrößen von MEMS-Mikrofonen	33
2.3.2. Experimentelle Bestimmung der Empfindlichkeit	34
2.4. Auslenkung von kreisrunden Membranen.....	38
2.4.1. Auslenkung einer kreisrunden Biegeplatte.....	38
2.4.2. Auslenkung mit Vorspannung	39
2.5. Kriechen	40
2.5.1. Bestimmung der sekundären Kriechrate	41
2.6. Simulationsumgebung Code-Aster	44
2.7. Grundlagen zur Finiten Elemente Methode	44
2.7.1. Einheitensystem.....	45
2.7.2. Modellierung - Erstellen der Geometrie	46
2.7.3. Vernetzung	47

2.7.4.	Aufsetzen der Berechnung.....	48
2.7.5.	Post-Processing – Darstellung der Ergebnisse.....	48
3.	Ergebnisse.....	50
3.1.	Simulation einer vorgespannten Membran in der Simulationsumgebung Code-Aster.....	50
3.2.	Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Auslenkung der Silizium-membran	58
3.3.	Simulation eines MEMS-Mikrofons	62
3.4.	Kriechverhalten für die Simulation	69
3.4.1.	Kriechrate aus Mittelung veröffentlichter Kriechraten	69
3.4.2.	Bestimmung der Kriechrate mit einem Nanoindenter	74
3.4.3.	Simulativer Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter	86
3.5.	Simulation der Temperaturhysterese	88
3.6.	Simulation verschiedener Lothöhen.....	92
3.7.	Einfluss der Wölbung der Lotstellen.....	94
4.	Diskussion	98
4.1.	Simulationen in der Simulationsumgebung Code-Aster	98
4.2.	Kriechverhalten für die Simulation	100
4.3.	Simulation der Temperaturhysterese	103
4.4.	Simulation von unterschiedlichen Lotparametern	103
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	104
	Literaturverzeichnis	106
	Eigene Veröffentlichungen	113
	Anhang A	114
	Anhang B	121
	Danksagung.....	124

Kurzfassung und Abstract

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die messtechnische und simulative Untersuchung der Temperaturhysterese der Empfindlichkeit von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen vorgestellt. Bei diesen MEMS-Mikrofonen wird die elektrische Verbindung über Lotkugeln mit der Lotlegierung SAC387 realisiert. Kriechdehnungen des Lots sind die Ursache für eine Temperaturhysterese.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell für die Beschreibung des Kriechverhaltes des Lots über eine mathematische Mittelung und eine experimentelle Bestimmung mithilfe eines Nanoindenters direkt an den Lotstellen bestimmt. Die mit diesen beiden Methoden bestimmten Kriechraten unterscheiden sich um einige Größenordnungen. Um beurteilen zu können, welche Kriechrate das Verhalten der Mikrofone realistisch widerspiegelt, wurden Simulationen mithilfe der finiten Elemente Methode mit den beiden unterschiedlichen Kriechraten durchgeführt und mit weiteren Messungen verglichen.

Die simulativen Berechnungen wurden in der Simulationsumgebung des Free and Open-Source-Simulationsprogramms Code-Aster durchgeführt. Verifikationsrechnungen zeigten, dass Code-Aster gute und realistische Ergebnisse liefert. Daraufhin zeigten die Berechnungen des Verhaltens der Mikrofone mit den beiden Kriechraten eindeutig, dass die Kriechrate, die aus den Nanoindentermessungen ermittelt wurde, das Verhalten der Mikrofone besser widerspiegelt.

Für weitere Simulationen wurde deshalb die Kriechrate aus der Nanoindentermessung verwendet. Mit dem so aufgestellten Modell wurde untersucht, welchen Einfluss die Form der Lotstellen auf die Temperaturhysterese hat. Zum einen wurde simuliert, wie sich unterschiedliche Lothöhen auf die Temperaturhysterese auswirken. Es konnte gezeigt werden, dass die Temperaturhysterese mit steigender Höhe der Lotstellen abnimmt

Zum anderen wurde untersucht, wie sich die Wölbung der Lotstellen auf die Temperaturhysterese auswirkt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wölbung der Lotstellen keinen relevanten Einfluss hat.

Abstract

In this thesis the temperature hysteresis of Flip-Chip MEMS-Microphones will be presented by experimental measurements and simulation. The electrical connection of these Flip-Chip MEMS-Microphones is realised via solder bumps with the solder alloy SAC 387. The creep behaviour of the solder bumps is the cause of the temperature hysteresis.

In this thesis the creep behaviour was determined by a mathematical average model and experimental research with a nanoindenter directly at the solder bumps. The two determined creep rates differ themselves in their magnitudes. In order to decide which creep rates will be chosen for further simulations, the behaviour of the microphone was simulated with both creep rates to see which one reflects the behaviour more appropriately. The simulations were then compared to experimental measurements.

The simulations were performed with finite element analysis by the free and open-source simulation program Code-Aster. Calculations, which have been executed to verify Code-Aster, have shown that Code-Aster provides good and reliable results. Therefore, the compared simulations with both creep rates have shown that the creep rate determined by the nanoindenter reflects the microphone behaviour the best.

The creep rate determined by the nanoindenter was used for further simulations. With this model the influence of the shape of the solder bumps on the temperature hysteresis could be analysed. First the height of the solder bumps has been varied and the effect on the temperature hysteresis has been simulated. The temperature hysteresis decreases with the increasing height of the solder bumps.

It was then simulated how the curvature of the solder joints affects the temperature hysteresis. The curvature of the solder bumps has a negligible influence on the temperature hysteresis.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons [1]	13
Abbildung 2: Vergleich von einem Bottom Port-Mikrofon (links) und einem Top-Port Mikrofon (rechts) [8].....	18
Abbildung 3: Vergleich Flip-Chip Montage (links) und Drahtbond Montage (rechts) [8].....	18
Abbildung 4: Trägersubstrat (HTCC) mit Lotkugeln für MEMS-Chip und Leiterbahnen [8].....	19
Abbildung 5: Trägerkeramik mit differentiellm Sensor-Chip [8].....	19
Abbildung 6: Trägerkeramik mit differentiellm Sensor-Chip und ASIC-Chip [8].....	20
Abbildung 7: Problematik bei der Laminierung der oberen Gegenelektrode mit Polymerfolie [8].....	20
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Aufbringens der Lift-Off-Folie [8].....	21
Abbildung 9: Kreisförmiges Einschneiden der Lift-Off-Folie mithilfe eines Lasers [8]	21
Abbildung 10: Die Lift-Off-Folie wurde an den ungewünschten Stellen entfernt [8]	21
Abbildung 11: Aufbringen der Polymerfolie, die Vor- und Rückvolumen voneinander trennt [8].....	22
Abbildung 12: Entfernung der Polymerfolie an ungewünschten Stellen [8].....	22
Abbildung 13: Lift-Off-Folie muss oberhalb des Sensors mithilfe von Laser entfernt werden [8]	22
Abbildung 14: Lift-Off-Folie und Polymerfolie sind entfernt worden [8].....	23
Abbildung 15: Aufbringen der Metallkappe, um Mikrofon zu verschließen [8]	23
Abbildung 16: Schematischer Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons [8]	24
Abbildung 17: Schematisches Ersatzschaltbild eines kapazitiven MEMS-Mikrofons nach [8]	25
Abbildung 18: Schematische Darstellung der kugelförmigen Verformung der Membran nach [7]	27
Abbildung 19: Blockschaltbild eines ASIC-Chips nach [8].....	28
Abbildung 20: Schematische Darstellung der destruktiven Interferenz zweier Wellen [15]	29

Abbildung 21: Darstellung einer Lotstelle mit Rekristallisationszonen in der Mitte [17]	31
Abbildung 22: CT-Aufnahme von zwei Lotstellen mit leicht unterschiedlicher Ausprägung der Lotstellen [17]	32
Abbildung 23: Schematische Darstellung der Messvorrichtung	35
Abbildung 24: Testjig zur experimentellen Bestimmung der Empfindlichkeit des Mikrofons [17]	35
Abbildung 25: Schematische Darstellung einer Membran mit Auslenkung in Wirkrichtung des Drucks [22]	38
Abbildung 26: Darstellung der Dehnung (links) und der Dehnrate (rechts) in Abhängigkeit der Zeit [28]	41
Abbildung 27: Schematische Darstellung einer Dogbone-Struktur für Zeitstandversuch nach [29]	42
Abbildung 28: Ergebnisse von Zeitstandversuchen für die Bestimmung der Kriechrate [29]	43
Abbildung 29: Allgemeines Vorgehen für eine Simulation unabhängig vom spezifischen Programm	45
Abbildung 30: Allgemeines Vorgehen für eine Simulation mit den verwendeten Programmen in der Simulationsumgebung Code-Aster	50
Abbildung 31: Geometrisches Modell der Siliziummembran (a) und Vernetzung der Membran (b).....	52
Abbildung 32: Befehl für Vernetzung im Linux-Terminal.....	52
Abbildung 33: Vergleich zwischen einer grob vernetzten und einer fein vernetzten Geometrie der Siliziummembran	53
Abbildung 34: Ergebnis der ersten Simulation	54
Abbildung 35: Ergebnis der Netzkonvergenzstudie	56
Abbildung 36: Berechnungsdauer der Simulationen aus Abbildung 35	57
Abbildung 37: Maximale Auslenkung der vorgespannten Membran in Abhängigkeit vom E-Moduls.....	59
Abbildung 38: Maximale Auslenkung einer nicht vorgespannten Membran	60
Abbildung 39: Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der Poisson-Zahl.....	61
Abbildung 40: Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der mechanischen Vorspannung.....	62

Abbildung 41: Schematische nicht maßstabsgerechte Darstellung des vereinfachten Mikrofonmodells für die Simulation	63
Abbildung 42: Geometrisches Modell des Mikrofons.....	64
Abbildung 43: Vernetzte Geometriestruktur des Mikrofons.....	65
Abbildung 44: Darstellung der strukturierten Vernetzung des Mikrofons.....	65
Abbildung 45: Ergebnis der Simulation im Schnittmodell	67
Abbildung 46: Nicht maßstabsgetreue Darstellung der verformten Membran	67
Abbildung 47: Netzkonvergenzstudie für die Auslenkung der Membran im Gesamtmodell.....	68
Abbildung 48: Vergleich der Kriechraten aus Veröffentlichungen, siehe Tabelle 3 [29], [51] – [53]	70
Abbildung 49: Darstellung der arithmetisch gemittelten Kriechrate mit den Kriechraten aus Tabelle 3 [29], [51] – [53]	71
Abbildung 50: Kriechraten aus Tabelle 3 mit Kriechrate Mittelung [29], [51] – [53]	73
Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf der Mikrofonempfindlichkeit nach einer Temperung und Vergleich von Messungen und Simulationen mit der Kriechrate Mittelung.....	74
Abbildung 52: Darstellung des Messablaufs bei einer Nanoindentermessung	76
Abbildung 53: Darstellung eines Vickers-Indenter mit projizierter Fläche und Eindringtiefe	76
Abbildung 54: Dreieck für die Berechnung der Kantenlänge a [49].....	77
Abbildung 55: Darstellung eines Messergebnisses einer Nanoindentermessung	78
Abbildung 56: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Zeit.....	79
Abbildung 57: Schematische Darstellung der beiden Effekte: Pile-Up und Sink-In ...	80
Abbildung 58: Schematische Darstellung des Pile-Up-Effektes mit dem Korrekturfaktor a_i	80
Abbildung 59: Darstellung einer Messstelle (a) mit AFM-Aufnahme (b) [49].....	81
Abbildung 60: Ergebnisse der Nanoindentermessung aus [49].....	82
Abbildung 61: Darstellung zweier Messstellen [49]	83
Abbildung 62: Kriechraten der Messungen mit arithmetischem Mittelwert [49]	84
Abbildung 63: Kriechrate Nanoindenter mit Standardabweichung [49]	85
Abbildung 64: Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter.....	86
Abbildung 65: Vergleich der Simulationen mit experimentellen Daten	88

Abbildung 66: Ergebnis des Vergleichs von Messungen und Simulationen bei einem kurzen Temperprozess.....	89
Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung nach einem 24 Stunden dauernden Temperprozess mit Vergleich von Messung und Simulationen	90
Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung nach einem 24 Stunden dauerndem Temperprozess mit logarithmischer Zeitachse.....	91
Abbildung 69: Vergleich der Simulationen mit Mikrofonen mit unterschiedlichen Lothöhen	92
Abbildung 70: Anfangsbereich der Messung und Simulationen aus Abbildung 69	93
Abbildung 71: Links (a) ist eine Lotstelle mit konvexer Ausprägung dargestellt. Rechts (b) ist eine Lotstelle mit deutlich konkaver Ausprägung dargestellt	94
Abbildung 72: Ergebnis der Simulation von Mikrofonen mit unterschiedlich ausgeprägten Lotkugeln.....	95
Abbildung 73: Empfindlichkeitsabweichung nach einem langen Temperprozess mit logarithmischer Darstellung der Zeit.....	96
Abbildung 74: Vergleich aller Kriechraten aus 3.4. [29], [51] – [53].....	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einheiten des Einheitensystems ,mm-tonne-s ‘	46
Tabelle 2: Materialparameter für Simulation [48].....	66
Tabelle 3: Koeffizienten für Garofalo-Modell aus Veröffentlichungen [29], [51] – [53]	69

Abkürzungsverzeichnis

$\dot{\epsilon}$	Kriechrate
°C	Grad Celsius
μ	Mikro als Vorsatz für Einheit
A	Fläche
AFM	engl.: Atomic Force Microscope/Microscopy für Rasterkraftmikroskop und -mikroskopie
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
A _{mpere}	Ampere
ASIC	engl.: Application Specific Integrated Circuit für anwendungsspezifische integrierte Schaltung
Au	Gold
AVDD	interne Spannungsversorgung
C	Kapazität
c	Schallgeschwindigkeit
C ₁ – C ₄	Koeffizienten
CAD	engl.: computer aided design für rechnergestütztes Konstruieren
CT	Computertomographie
dB	Dezibel
E	Elastizitätsmodul, auch E-Modul
EDF	Electricite de France
F	Kraft
f	Frequenz
FEM	Finite Elemente Methode
G	Giga als Vorsatz für Einheit
Gl.	Gleichung
h	Dicke
h _c	Eindringtiefe
h _{Stunde}	Stunde
HTCC	engl.: High Temperature Cofired Ceramic für Hochtemperatur-Mehrlagenkeramik

Hz	Hertz
I	Stromstärke
K	Kelvin
k	kilo als Vorsatz für Einheit
kg	Kilogramm
l	Länge
M	Mega als Vorsatz für Einheit
m	Meter
m _{asse}	Masse
MEMS	Mikro elektro mechanisches System
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
n	nano als Vorsatz für Einheit
N	Newton
Ni	Nickel
p	Druck
Pa	Pascal
Q	Ladung
r	Radius
R	allgemeine Gaskonstante
s	Sekunde
SAC	Abkürzung für Lotlegierung aus Sn, Ag und Cu
SNR	engl.: signal to noise ratio für Rauschabstand
SPL	engl.: Sound Pressure Level für Schalldruckpegel
T	Temperatur
t	Zeit
THD	engl.: total harmonic distortion für Klirrfaktor
t _{onne}	Tonne
U	Spannung
V	Volt
VDD	externe Spannungsversorgung
VREG	Spannungsregler
w (r)	Auslenkung in Abhängigkeit vom Radius

x	Ort
α	Öffnungswinkel
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante
λ	Wellenlänge
ν	Poisson-Zahl
σ	mechanische Spannung
σ_{vor}	mechanische Vorspannung

1. Einleitung

Die Miniaturisierung elektromechanischer Bauelemente und Systeme ermöglicht den Aufbau und die Verkleinerung vieler moderner technischer Geräte. Wesentlich für die Miniaturisierung der Bauelemente sind die Gehäusetechnologien. Anhand eines MEMS-Mikrofons (Mikro-Elektro-Mechanische Systeme) wurde die Flip-Chip Montage von MEMS-Bauelementen in dieser Arbeit durch Messungen und Simulationen untersucht. Abbildung 1 zeigt den schematischen Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons. [1]

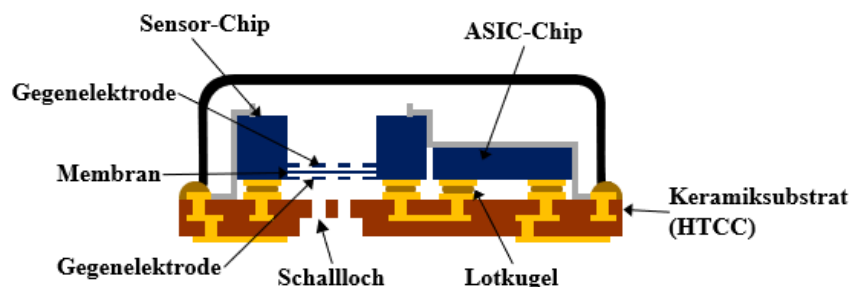


Abbildung 1: Schematischer Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons [1]
 Auf dem Keramiksubstrat (HTCC, für High Temperature Cofired Ceramics) befinden sich Lotkugeln, ein Sensor-Chip mit zwei Gegenelektroden und einer Membran und ein ASIC-Chip (Application Specific Integrated Circuit).

MEMS-Mikrofone werden heute unter anderem in Mobiltelefonen, Hörgeräten und der Unterhaltungselektronik eingesetzt. Neben der Schallaufnahme werden sie auch für die Störgeräuschunterdrückung (engl.: Noise-Cancelling) genutzt. Bei dieser Anwendung ist es wichtig, dass sich die Empfindlichkeiten der in einem Gerät verwendeten Mikrofone nur wenig unterscheiden. Streuungen kleiner ± 1 dBV/Pa bei Empfindlichkeiten von -38 dBV/Pa sind derzeit Stand der Technik [2]. Thermomechanische Spannungen der Sensorchips verursachen Empfindlichkeitsstreuungen. Erste Untersuchungen zum Verhalten von MEMS-Mikrofonen nach dem Tempern zeigten, dass sich die gemessene Empfindlichkeit der Mikrofone nach einem Temperprozess deutlich verändert hat [3]. Bei Temperaturen unter oder über der Raumtemperatur entstehen durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten mechanische Spannungen und Dehnungen. Wird das Mikrofon wieder auf Raumtemperatur gebracht, entsteht so ein anderer Spannungszustand als vor der

Temperaturbelastung. Aufgrund der Veränderung des Spannungszustandes kommt es zu einer Temperaturhysterese der Empfindlichkeit der Mikrofone.

1.1. Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese Veränderungen von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen sowohl messtechnisch als auch simulativ mithilfe der finiten Elemente Methode (FEM) untersucht werden.

Die Empfindlichkeiten der Mikrofone sollen mit einer Druckkammermessvorrichtung durchgeführt werden. Die Simulationen werden mithilfe der Open-Source-Software Code-Aster berechnet. Eine Open-Source-Software wird auch deshalb gewählt, um zu untersuchen, wie praktikabel diese für FEM-Simulationen ist und ob sich diese für die Simulationen der Temperaturhysterese eignet. Da Code-Aster über keine Materialdatenbanken verfügt, müssen Teilsimulationen durchgeführt werden, die dann im Gesamtmodell zusammengefügt werden können.

Die Temperaturhysterese wird in dieser Arbeit sowohl experimentell als auch simulativ untersucht. Bei den ersten messtechnischen Untersuchungen werden die MEMS-Mikrofone für eine Stunde bei einer Temperatur von 100 °C getempert und anschließend die Empfindlichkeitsabweichung vom Anfangswert bestimmt. Um zu untersuchen, wie lange es dauert, bis die Mikrofone nach einer Temperaturbelastung wieder in etwa den Anfangswert erreichen, werden die Mikrofone bei 120 °C für eine Dauer von 24 Stunden getempert und der zeitliche Verlauf der Empfindlichkeitsabweichungen bestimmt.

Erste Untersuchungen zur Temperaturhysterese der MEMS-Mikrofone zeigten, dass sich die Empfindlichkeit der Mikrofone durch eine Temperatureinwirkung ändert [3]. Um dies mithilfe von Simulationen beschreiben zu können, soll ein Simulationsmodell aufgebaut werden, das dieses Verhalten wiedergibt. Das Simulationsmodell soll mithilfe von Messungen verifiziert werden. Dann ist es möglich mithilfe des Simulationsmodells Optimierungen am Mikrofon zu berechnen. Im Anschluss soll im Rahmen dieser Arbeit für zwei verschiedene Parameter der Lotstellen untersucht werden, inwieweit sich diese auf die Temperaturhysterese auswirken.

Zum einen soll der Einfluss der Wölbung der Lotkugeln und zum anderen die Höhe der Lotkugeln auf die Empfindlichkeit der Mikrofone untersucht werden.

1.2. Übersicht über die Arbeit

Die weitere Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut:

Nach der Einleitung in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die Grundlagen beschrieben. Nach einer kurzen Übersicht über die verschiedenen Wandlerarten von MEMS-Mikrofonen, wird der Aufbau und die Funktionsweise von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen erläutert. Anschließend werden die Geräuschunterdrückung und die Temperaturhysterese beschrieben. Dann wird auf die Ausbreitung des Schalls und die messtechnischen Größen von MEMS-Mikrofonen eingegangen. Danach wird die analytische Bestimmung der Auslenkung von dünnen Membranen beschrieben.

Im Anschluss werden die Grundlagen zum Kriechverhalten erläutert. In den darauffolgenden Kapiteln wird die Methodik der Finiten Elementen Methode allgemein beschrieben.

Kapitel 3 stellt die Ergebnisse dieser Arbeit dar. Zunächst wird die FEM-Simulation mittels Code-Aster anhand einer dünnen und vorgespannten Membran erläutert. Im nächsten Schritt wird die Simulation eines MEMS-Mikrofons ohne Betrachtung der Temperaturhysterese beschrieben.

Für die Betrachtung der Temperaturhysterese ist die Kriechrate entscheidend. Welche Kriechrate verwendet wird, wird in den darauffolgenden Teilen von Kapitel 3 beschrieben.

Anschließend werden messtechnische Bestimmungen der Temperaturhysterese mit Simulationen verglichen. Danach wird der Einfluss der Höhe der Lotstelle anhand von vier unterschiedlichen Lothöhen und der Einfluss der Wölbung der Lotstellen untersucht.

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse diskutiert und in Kontext zueinander gebracht. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und zeigt im Ausblick mögliche Ansatzpunkte für weitere verwandte Forschung.

2. Grundlagen

2.1. MEMS-Mikrofone

MEMS-Mikrofone sind aufgrund ihrer sehr kleinen Bauform und ihren guten elektroakustischen Eigenschaften schon seit längerem Stand der Technik in der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik (Mobiltelefon, Kopfhörer, Laptop, Tablet, Head-Set usw.). Mikrofone nehmen im Allgemeinen Schallsignale auf und wandeln diese in elektrische Signale um. Sie können sich in ihrer Wandlerart unterscheiden. Die häufigsten Wandlerarten sind: piezoelektrische, piezoresistive, elektrodynamische und kapazitive Wandler. [4]

Piezoelektrisches Mikrofon

Bei piezoelektrischen Mikrofonen ist die Membran mechanisch mit einem piezoelektrischen Material gekoppelt, das durch Druckschwankungen des Schalls verformt wird. Die elektrischen Spannungsschwankungen des piezoelektrischen Materials werden zu einem Verstärker übertragen und anschließend detektiert. Piezoelektrische Mikrofone sind zwar mechanisch robust, allerdings ist der hohe Klirrfaktor ein Nachteil. [5] [6]

Piezoresistives Mikrofon

Bei piezoresistiven Mikrofonen bewirkt die Membranausdehnung, die durch den Schalldruck verursacht wird, eine Widerstandsänderung in piezoresistiven Halbleitermaterialien in der Siliziummembran [4]. Vier piezoresistive Widerstände werden so aufgebracht, dass sie in einer vollen oder halben Wheatstone-Brücke verschaltet sind. Die Sensitivität kann erhöht werden, indem die Widerstände so platziert werden, dass bei einer Auslenkung und Dehnung der Membran jeweils zwei Widerstände erhöht und zwei verringert werden. Durch eine Drehung der Widerstände um 90° wird dies erreicht. Piezoresistive Mikrofone haben eine starke Temperaturempfindlichkeit, wofür eine getrennte Temperaturkompensation benötigt wird. [5] [6]

Elektrodynamisches Mikrofon

Bei elektrodynamischen Mikrofonen ist die Membran mit einem metallenen Bändchen oder mit einer Spule verbunden. Die Membranauslenkung, die durch die Schallwelle verursacht wird, bewirkt eine Bewegung des Bändchens bzw. der Spule in einem permanenten Magnetfeld. Durch die Bewegung des Bändchens bzw. der Spule werden Ströme induziert, die dann weiterverarbeitet werden können. [5] [6]

Kapazitives Mikrofon

Bei kapazitiven Mikrofonen bildet eine sehr dünne Membran mit ein oder zwei Gegenelektroden einen Plattenkondensator. Die eintreffende Schallwelle bewirkt eine Verformung der Membran und dies führt zu einer Kapazitätsänderung zwischen der Membran und den Gegenelektroden. Kapazitive MEMS-Mikrofone haben sich inzwischen in der Unterhaltungselektronik etabliert. Die meisten derzeit erhältlichen MEMS-Mikrofone nutzen kapazitive Wandler. Da in dieser Arbeit die durchgeführten Simulationen und experimentellen Messungen an kapazitiven MEMS-Mikrofonen durchgeführt werden, werden in Kapitel 2.1.1. der Aufbau und die Funktionsweise des kapazitiven MEMS-Mikrofons genauer erläutert. [7] Die Dissertationen von Reutter und Martin liefern einen anschaulichen Überblick über die unterschiedlichen Wandlerarten [5] [7].

2.1.1. Aufbau und Funktionsweise von kapazitiven MEMS-Mikrofonen

Kapazitive MEMS-Mikrofone können sich in ihrer Aufbauweise unterscheiden. Bei MEMS-Mikrofonen können zwei unterschiedliche Arten der Schallzuführung zu Unterschieden in der Aufbauweise führen. Es gibt Top-Port- und Bottom-Port-Lösungen. Bei Top-Port Mikrofonen wird der Schall über die Gehäuseoberseite zur Membran geführt. Bei Bottom-Port-Mikrofonen erfolgt die Schallzuführung zur Membran von der Gehäuseunterseite. Welche Aufbauweise jeweils verbaut wird, hängt von der Platzierung innerhalb des Gerätes ab. Beide Varianten sind in Abbildung 2 dargestellt. [8]

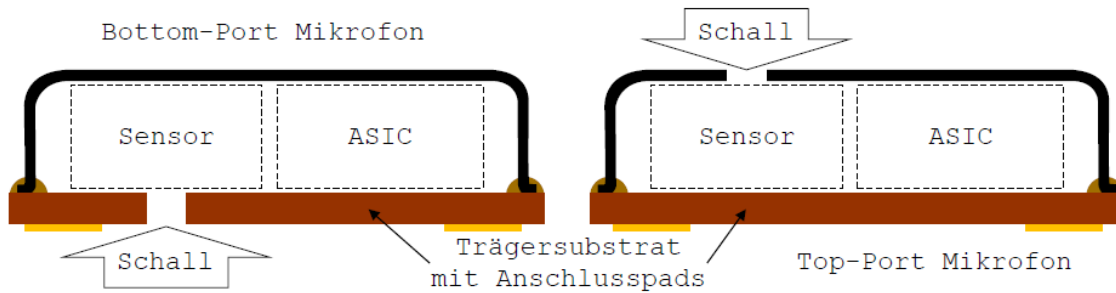


Abbildung 2: Vergleich von einem Bottom Port-Mikrofon (links) und einem Top-Port Mikrofon (rechts) [8]

Bei einem Bottom-Port-Mikrofon (links) erfolgt die Schallzuführung über die Gehäuseunterseite und bei einem Top-Port Mikrofon (rechts) erfolgt die Schallzuführung über die Gehäuseoberseite.

In dieser Arbeit werden die Simulationen für ein Mikrofon mit der Bottom-Port-Aufbauweise durchgeführt. Bei Bottom-Port Mikrofonen gibt es zwei Möglichkeiten für die Kontaktierung des Sensorchips. Es kann zwischen der Flip-Chip-Montage, bei der die elektrische Verbindung über Lotkugeln hergestellt wird, und der Drahtbond-Montage, bei der die elektrische Verbindung über Bonddrähte hergestellt wird, unterschieden werden, siehe Abbildung 3. [8]

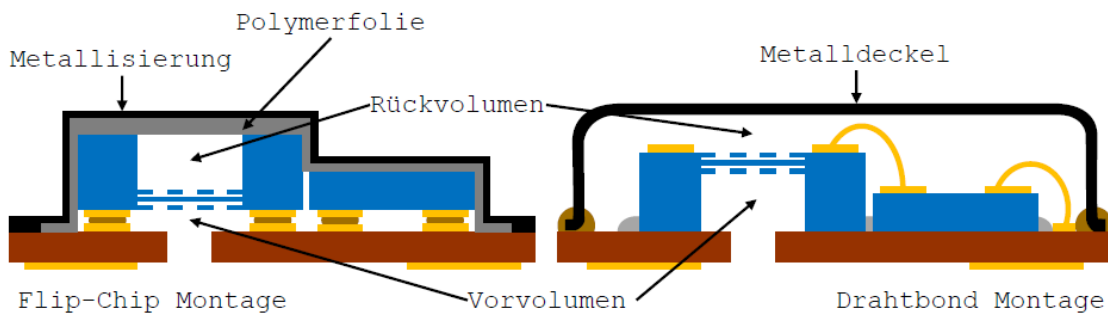


Abbildung 3: Vergleich Flip-Chip Montage (links) und Drahtbond Montage (rechts) [8]

Bei der Flip-Chip Montage (links) erfolgt die elektrische Verbindung durch Lotkugeln. Bei der Drahtbond Montage erfolgt die elektrische Verbindung durch Bonddrähte.

In dieser Arbeit werden die Simulationen für ein Flip-Chip und Bottom-Port MEMS-Mikrofon durchgeführt. Die Fertigung eines solchen Mikrofans wird nachfolgend detailliert beschrieben. Bei dem Sensorchip dieser Mikrofone handelt es sich um einen differentiellen Sensorchip mit zwei Gegenelektroden. [8]

Durch diese Aufbauweise ist ein größeres Rückvolumen beim Mikrofon möglich [8]. Ein größeres Rückvolumen ermöglicht eine höhere Sensitivität. Aufgrund des größeren Rückvolumens verringert sich die Rückstellkraft der Membran und ermöglicht

eine größere Auslenkung der Membran. Die Prozessschritte werden anhand eines schematischen Querschnitts mit je zwei Mikrofonen beschrieben. In der Fertigung werden die Prozessschritte an sogenannten Mikrofon-Panels, auf denen sich je nach Mikrofongröße bis zu 1000 Mikrofone befinden können, durchgeführt. [8]

Bei dem Trägersubstrat für das Flip-Chip Mikrofon handelt es sich um eine High Temperature Cofired Ceramic (kurz HTCC), siehe Abbildung 4.

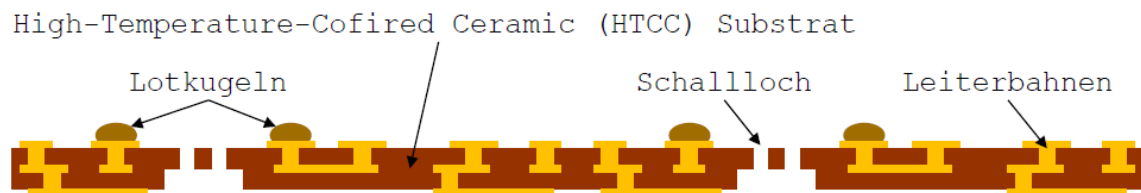


Abbildung 4: Trägersubstrat (HTCC) mit Lotkugeln für MEMS-Chip und Leiterbahnen [8]
Auf dem Trägersubstrat befinden sich die Lotkugeln für die elektrische Kontaktierung des Mikrofon. Durch das Schallloch gelangt der Schall zum Mikrofon.

Das Trägersubstrat hat nach [8] und [9] eine ausreichende elektrische Isolation, einen kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine ausreichend glatte Oberfläche. Es befinden sich die Schalleintrittslöcher, die Kontaktpads aus Ni/Au und die Leiterbahnstrukturen (Molybdän und Wolfram) in und auf der Keramik (Al_2O_3) [8]. Auch die Lotkugeln befinden sich schon auf der Keramik. Dies wird gemacht, da die Lotkugeln nicht direkt auf dem Sensor-Chip aufgebracht werden können, ohne die Membran zu verschmutzen oder zu beschädigen. [8]

Abbildung 5 zeigt die Trägerkeramik mit dem differentiellen Sensor-Chip. Dieser wird mit einem Pick-and-Place-Prozess auf die Keramik aufgebracht und anschließend mit einem Reflow-Prozess verlötet. [8]

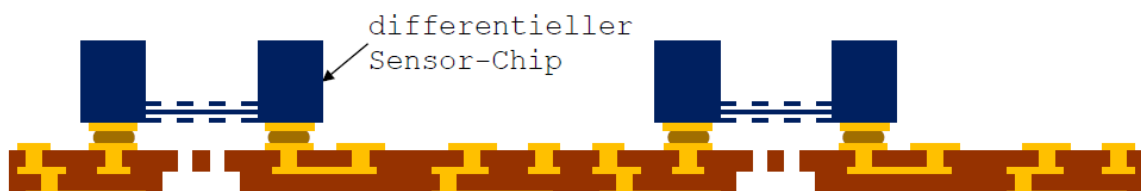


Abbildung 5: Trägerkeramik mit differentieller Sensor-Chip [8]
Der Sensor-Chip wird durch den Pick-and-Place-Prozess auf die Lotkugeln aufgebracht und anschließend durch einen Reflow-Prozess verlötet.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bestückung der programmierbaren ASIC-Chips. Der ASIC-Chip wird auch durch Pick-and-Place auf das Trägersubstrat positioniert. In einem zweiten Reflow-Prozessschritt wird dann der ASIC-Chip verlötet, siehe Abbildung 6. [8]

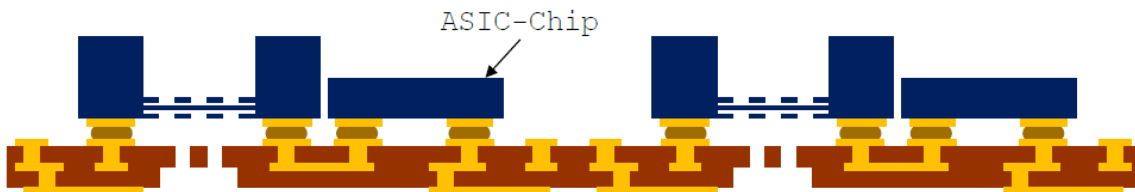


Abbildung 6: Trägerkeramik mit differentiellem Sensor-Chip und ASIC-Chip [8]
Der ASIC-Chip wird durch den Pick-and-Place-Prozess auf die Lotkugeln aufgebracht und anschließend durch einen Reflow-Prozess verlötet.

Bei Mikrofonaufbauten mit der Drahtbondtechnik ist durch die dichte Verklebung von Sensor-Chip und Substrat kein zusätzlicher Prozessschritt zur Trennung von Vor- und Rückvolumen notwendig. Beim Flip-Chip-Aufbau ist diese Trennung noch nicht vorhanden, da durch die Verlotung des Sensor-Chips an den Lotstellen eine Verbindung zwischen Vor- und Rückvolumen besteht. Die Trennung der beiden Volumina erfolgt durch eine Polymerfolie. Diese wird mit einem Vakuum-Laminierungsprozess auf die Keramik aufgebracht. Um zu verhindern, dass die Polymerfolie auf die obere Gegenelektrode laminiert wird (siehe Abbildung 7) und das Rückvolumen minimiert wird, wird der Sensor zunächst über eine starre Folie verschlossen. [8]

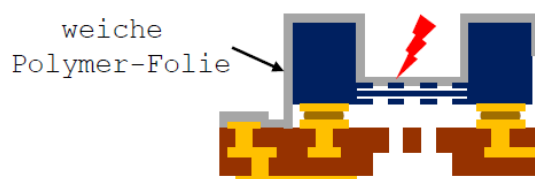


Abbildung 7: Problematik bei der Laminierung der oberen Gegenelektrode mit Polymerfolie [8]
Würde die weiche Polymerfolie sofort auf die beiden Chips laminiert, läge diese direkt auf der Gegenelektrode auf und verkleinert das Rückvolumen.

Unter definiertem Druck und Temperatur wird eine Lift-Off-Folie auf das Mikrofonpanel aufgebracht. Die Lift-Off-Folie legt sich durch ihre starre Beschaffenheit ausschließlich auf den Sensor-Chip ab, siehe Abbildung 8. [8]

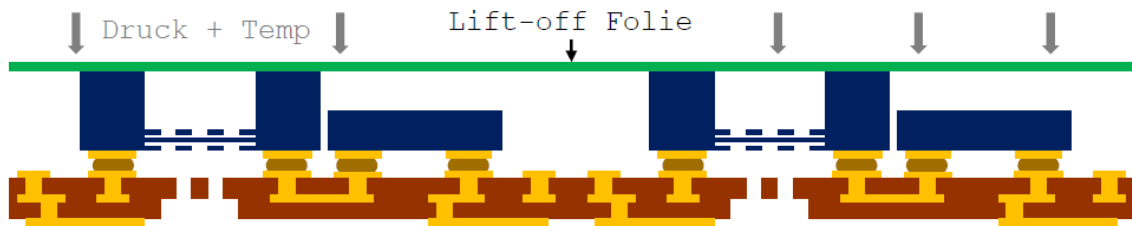


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Aufbringens der Lift-Off-Folie [8]
Das Aufbringen der Lift-Off-Folie soll verhindern, dass die weiche Polymerfolie direkt auf der Gegenelektrode aufliegt.

Die Lift-Off-Folie muss vor dem Laminieren der weichen Polymerfolie an den nicht benötigten Stellen entfernt werden. Dies wird mithilfe eines Lasers gemacht. Dieser schneidet auf der Oberfläche des Sensors die Lift-Off-Folie kreisförmig ein, siehe Abbildung 9. [8]

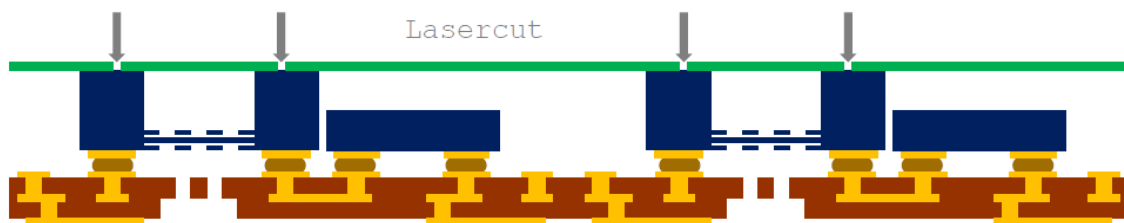


Abbildung 9: Kreisförmiges Einschneiden der Lift-Off-Folie mithilfe eines Lasers [8]
Durch das kreisförmige Einschneiden der Lift-Off-Folie ist es möglich diese an den nicht benötigten Stellen abzutragen.

Im nächsten Schritt wird die Lift-Off-Folie an den nicht benötigten Stellen entfernt. Abbildung 10 zeigt das übrig gebliebene Mikrofonpanel mit den verschlossenen Sensor-Chips. [8]

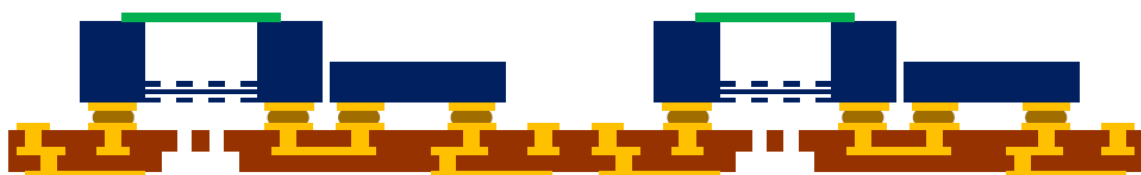


Abbildung 10: Die Lift-Off-Folie wurde an den ungewünschten Stellen entfernt [8]
Durch das Abtragen der Lift-Off-Folie an den ungewünschten Stellen ist es möglich die Polymerfolie im nächsten Schritt aufzubringen.

Anschließend kann die weiche Polymerfolie, die das Vorvolumen vom Rückvolumen trennt, auf den Sensor- und ASIC-Chip aufgebracht werden. Dies wird mithilfe von Vakuum und thermischer Laminierung durchgeführt, siehe Abbildung 11. [8]

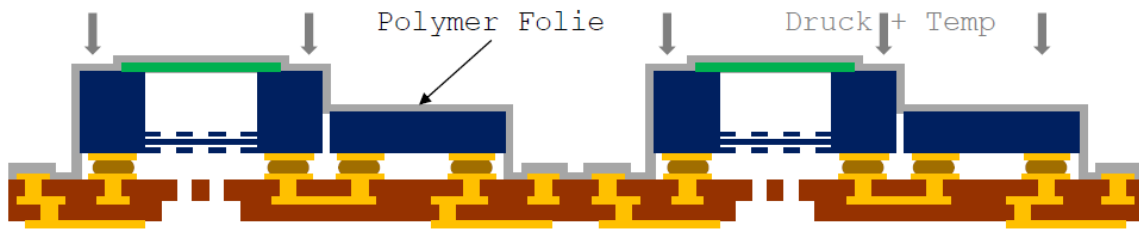


Abbildung 11: Aufbringen der Polymerfolie, die Vor- und Rückvolumen voneinander trennt [8]

Die Polymerfolie wird mithilfe von Vakuum und thermischer Laminierung aufgebracht.

Das Vorvolumen ist durch die Lothöhe und die Chipfläche begrenzt. Für die in dieser Arbeit verwendete Mikrofongeometrie ergibt sich ein Vorvolumen von $0,3 \text{ mm}^3$. Die Polymerfolie umschließt in Abbildung 11 noch die Keramik und die Leiterbahnflächen. An diesen Stellen muss die Polymerfolie noch entfernt werden. Dies erfolgt mit einem Laser-Ablationsprozess. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 dargestellt. [8]

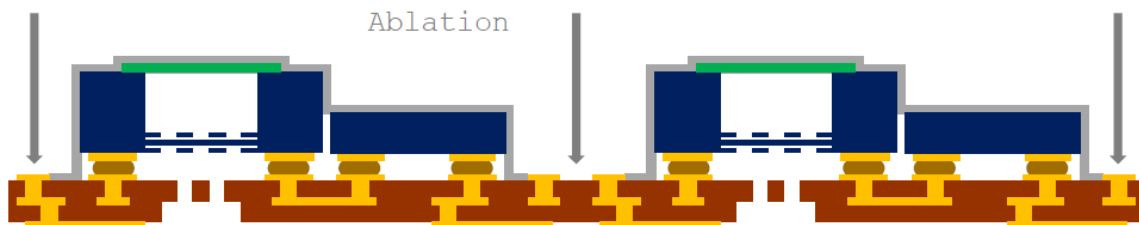


Abbildung 12: Entfernung der Polymerfolie an ungewünschten Stellen [8]

Die Polymerfolie wird mithilfe eines Laser-Ablationsprozesses an ungewünschten Stellen freigelegt. So werden die elektrischen Kontaktflächen und die Keramik-Sägestraße freigelegt.

Anschließend muss die Polymerfolie, die sich auf dem Sensor-Chip befindet, entfernt werden. Dies erfolgt analog zur Entfernung der Lift-Off-Folie mittels einem kreisförmigen Laser-Einschnitt auf der Oberseite des Sensors, siehe Abbildung 13. [8]

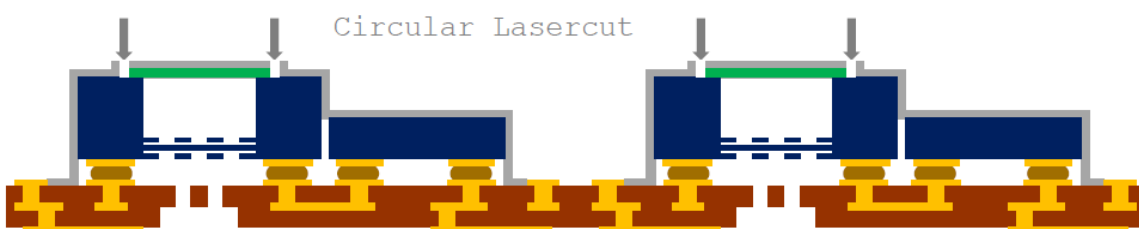


Abbildung 13: Lift-Off-Folie muss oberhalb des Sensors mithilfe von Laser entfernt werden [8]

Dafür wird die Lift-Off-Folie kreisförmig an der Oberseite des Sensor-Chips eingeschnitten.

Im nächsten Schritt werden die Lift-Off-Folie und die Polymerfolie von der Sensoroberfläche entfernt. Das Rückvolumen des Mikrofons ist nun geöffnet. Dies zeigt Abbildung 14. [8]

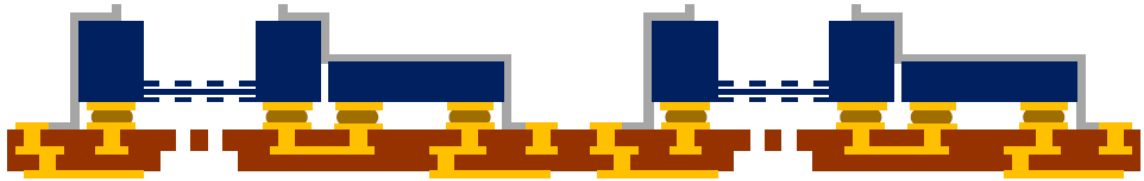


Abbildung 14: Lift-Off-Folie und Polymerfolie sind entfernt worden [8]
Die beiden Folien sind von der Sensoroberfläche entfernt worden und das Mikrofonrückvolumen ist freigelegt.

Das freigelegte Mikrofon wird nun mit einer Metallkappe verschlossen. Dies dient zum einen dazu, dass das Rückvolumen des Mikrofons begrenzt wird und zum anderen, dass das Mikrofon vor äußeren Einflüssen geschützt wird. [8]

Die Metallkappe wird mit einem elektrisch leitfähigen Kleber zum Schutz vor elektromagnetischen Störungen über die auf der Keramik vorgesehenen Kontaktflächen an das Trägersubstrat angebracht. Das Mikrofon kann bspw. durch Sende- oder Empfangssignale beeinflusst werden, wenn es im Mobiltelefon in der Nähe der Antenne angebracht wird. Der leitfähige Kleber wird lückenlos rund um die beiden Chips auf den dafür vorhergesehenen elektrischen Kontaktflächen aufgetragen. Anschließend kann die Metallkappe aufgesetzt werden und der Kleber wird thermisch ausgehärtet. Die fertigen Mikrofone befinden sich nun auf dem Mikrofonpanel. Abbildung 15 zeigt zwei fertige noch nicht getrennte Mikrofone. [8]

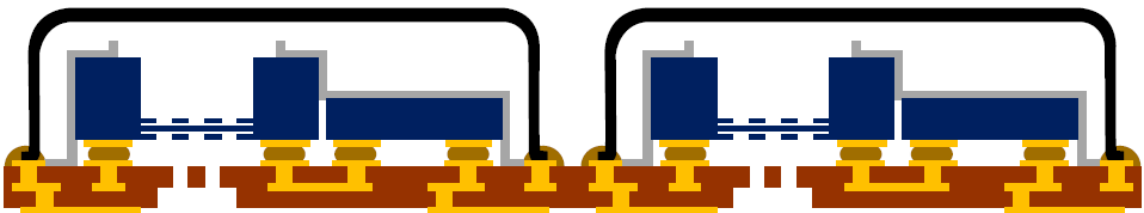


Abbildung 15: Aufbringen der Metallkappe, um Mikrofon zu verschließen [8]
Durch die Metallkappe ist das Rückvolumen begrenzt. Die Metallkappe wird mit einem leitfähigen Kleber an das Trägersubstrat angebracht.

Das Rückvolumen ist nun verschlossen und hat für die in dieser Arbeit verwendete Mikrofonengeometrie eine Größe von $3,4 \text{ mm}^3$. Die Mikrofone auf dem Panel werden durch einen Sägeprozess voneinander getrennt. Das fertige Mikrofon ist in Abbildung 16 als schematischer Querschnitt dargestellt. [8]

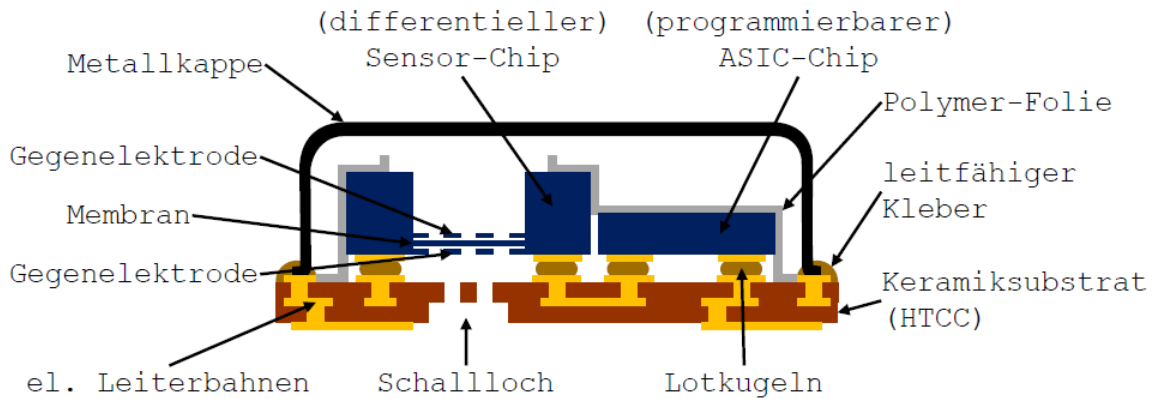


Abbildung 16: Schematischer Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons [8]
 Alle Teile sind nun miteinander verbunden und die Mikrofone wurden vom Panel entfernt.

Das in dieser Arbeit untersuchte Mikrofon hat eine Größe von $3,35 \times 2,5 \times 1,00 \text{ mm}^3$. Dies ergibt sich aus den Abmessungen des differentiellen Sensor-Chips ($1,45 \times 1,45 \times 0,45 \text{ mm}^3$) und des ASIC-Chips ($1,00 \times 1,45 \times 0,30 \text{ mm}^3$). Wie oben beschrieben beträgt das Vorvolumen ca. $0,3 \text{ mm}^3$ und das Rückvolumen etwa $3,4 \text{ mm}^3$. Dieses große Rückvolumen wird durch die Flip-Chip-Aufbauweise ermöglicht. Ein Mikrofon mit einem Drahtbond-Aufbau hat ein ungefähr $0,3 \text{ mm}^3$ kleineres Rückvolumen. Bei einem Drahtbond-Aufbau mit denselben Chipgrößen und unter Vernachlässigung des Polymerfolienvolumens würde das Rückvolumen bei $3,1 \text{ mm}^3$ ($= 3,4 \text{ mm}^3 - 0,5 \text{ mm}^3 + 0,2 \text{ mm}^3$) liegen. So ergibt sich für den Flip-Chip-Aufbau ein ca. 8,8 % größeres Rückvolumen im Vergleich zum Drahtbond-Aufbau. Vorteil eines hohen Rückvolumens sind geringere Rückstellkräfte auf die Membran und dadurch eine höhere Empfindlichkeit. [8]

Abbildung 16 zeigt, dass das Mikrofon aus zwei Chips besteht – dem Sensor-Chip und dem ASIC-Chip. Bei dem Sensorchip handelt es sich um einen differentiellen Sensor-Chip. Dies bedeutet, dass sich die Membran mittig zwischen zwei Gegenelektroden befindet. Für die Beschreibung der Funktionsweise wird angenommen, dass es sich um Plattenkondensatoren mit zwei parallel geschalteten Kondensatoren handelt. Das Arbeitsprinzip ist schematisch in Abbildung 17 nach [8] schematisch dargestellt. [8]

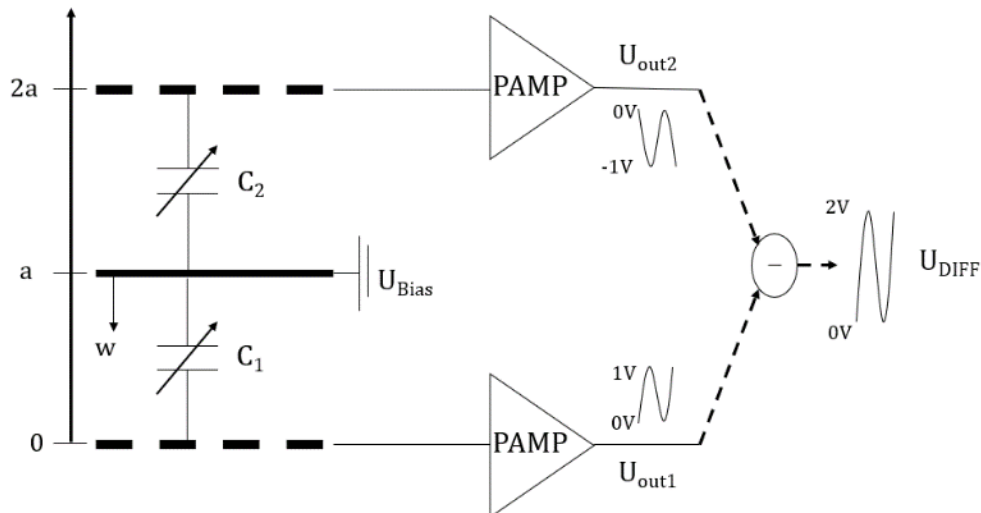


Abbildung 17: Schematisches Ersatzschaltbild eines kapazitiven MEMS-Mikrofons nach [8]
Die Membran befindet sich symmetrisch zwischen den beiden Gegenelektroden.

Die beiden Plattenkondensatoren werden über eine Gleichspannung U_{Bias} vorgeladen. Die Auslenkung der Membran bei Schalleintritt führt bei einer konstanten Ladung Q_a zu einer Änderung der über die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 abfallenden Spannungen, siehe Gl. 1 und Gl. 2. Diese Betrachtung bezieht sich auf eine Kolbenmembran. [8]

$$U_1(a - w) = \frac{Q_a}{C_1 * (a - w)} = Q_a * \left(\frac{a - w}{\epsilon_0 * A} \right) \quad \text{Gl. 1}$$

$$U_2(a + w) = \frac{Q_a}{C_2 * (a + w)} = Q_a * \left(\frac{a + w}{\epsilon_0 * A} \right) \quad \text{Gl. 2}$$

An den beiden Gegenelektroden kann eine von der Membranauslenkung abhängige Potentialänderung abgegriffen werden. Die Spannung am ersten Mikrofonausgang kann mithilfe von Gl. 3 berechnet werden. [8]

$$\begin{aligned} U_{out1} &= U_{Bias} - U_1 * (a - w) = U_{Bias} - U_{Bias} * \left(1 - \frac{w}{a} \right) \\ &= U_{Bias} * \frac{w}{a} \end{aligned} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Spannung am zweiten Mikrofonausgang kann mithilfe von Gl. 4 berechnet werden. [8]

$$\begin{aligned}
 U_{\text{out2}} &= U_{\text{Bias}} - U_2 * (a + w) = U_{\text{Bias}} - U_{\text{Bias}} * \left(1 + \frac{w}{a}\right) \\
 &= - U_{\text{Bias}} * \frac{w}{a}
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. 4}$$

Aus Gl. 3 und Gl. 4 ist zu erkennen, dass sich die beiden Ausgangsspannungen nur im Vorzeichen unterscheiden. Man erhält das differentielle Ausgangssignal über die Differenz der beiden Ausgangsspannungen, siehe Gl. 5. [8]

$$U_{\text{Diff}} = U_{\text{out1}} - U_{\text{out2}} = 2 * \left(U_{\text{Bias}} * \frac{w}{a} \right) \quad \text{Gl. 5}$$

Die Ausgangsspannung wird von der elektrischen Vorspannung und dem Auslenkungsverhältnis der Membran bestimmt. Mit der differentiellen Sensorstruktur ist im Gegensatz zur Aufbauweise mit nur einer Gegenelektrode das Ausgangssignal in seiner Amplitude verdoppelt. Im logarithmischen Maßstab entspricht dies einer Signal-erhöhung um 6 dB gegenüber einem Sensorchip mit einer Gegenelektrode. Die Membran wird von beiden Seiten elektrostatisch angezogen. Im vereinfachten Fall einer Kolbenmembran berechnet sich die elektrostatische Anziehungskraft der beiden Gegenelektroden auf die Membran F_{elDiff} nach Gl. 6. [8]

$$\begin{aligned}
 F_{\text{elDiff}} &= F_{\text{el1}} - F_{\text{el2}} \\
 &= \frac{\epsilon_0 * A * U_{\text{B}}^2}{2} * \left(\frac{1}{(a + w)^2} - \frac{1}{(a - w)^2} \right)
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. 6}$$

In [10] wird beschrieben, dass mit der differentiellen Sensortechnologie ein um bis zu 30 % größeres Vorspannungsfeld im Vergleich zum Aufbau mit einer Gegenelektrode möglich ist. Des Weiteren hat die Aufbauweise mit zwei Gegenelektroden eine um 3 dB höhere Rauschleistung [11] [12]. Der Signal-zu-Rausch-Abstand ist damit bei zwei Gegenelektroden um etwa 3 dB größer. MEMS-Mikrofone mit einem differentiellen Sensorchip sind inzwischen Stand der Technik. [8]

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen ist die Kapazität der beiden Kondensatoren von großer Bedeutung. In der Beschreibung der Funktionsweise wurde als Vereinfachung angenommen, dass es sich bei der Membran zwischen den beiden Kondensatoren um eine Kolbenmembran handelt, die sich bei Schalleintritt konstant verschiebt. Allerdings verformt sich eine kreisrunde Membran mit fester

Einspannung am Rand bei Schalldruck nicht gleichmäßig, sondern in guter Näherung kugelförmig. Dies bedeutet, dass der Abstand zwischen Membran und den beiden Gegenelektroden nicht über die gesamte Fläche gleich groß ist. Dies ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt [7]

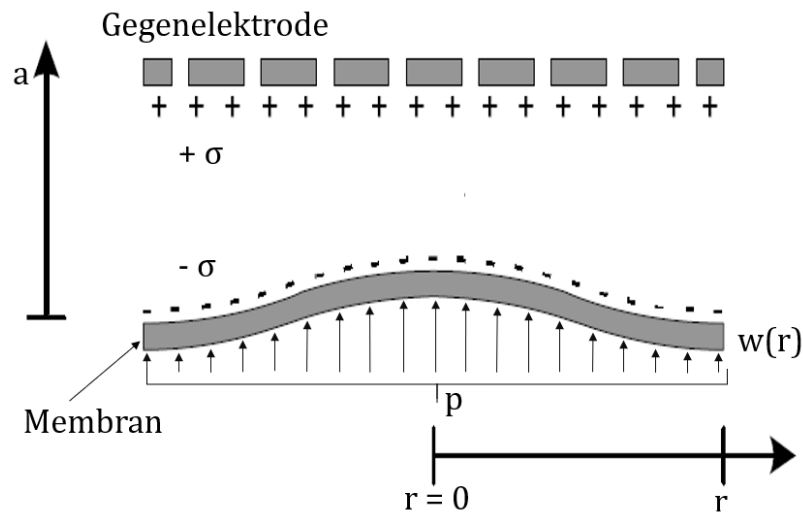


Abbildung 18: Schematische Darstellung der kugelförmigen Verformung der Membran nach [7]

Es ist die obere Gegenelektrode des Mikrofons und die Membran zu erkennen. Bei einem wirkenden Druck p verformt sich die Membran und die Kapazität zwischen der Membran und der Gegenelektrode ändert sich. Analog verhält es sich mit der unteren Gegenelektrode.

Bei Abbildung 18 handelt es sich also schematisch um einen Plattenkondensator, bei dem der Abstand der Platten über den Radius nicht konstant ist.

Nach [7] kann die Kapazität zwischen der planen oberen Gegenelektrode und einer kugelförmig verformten Membran folgendermaßen berechnet werden:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 * A}{a} + \frac{1}{3} \frac{w(r=0)}{a} \frac{\epsilon_0 * A}{a - w(r=0)} \quad \text{Gl. 7}$$

C steht für die Kapazität, ϵ_0 für die elektrische Feldkonstante, A für die Fläche, a für den Anfangsabstand zwischen der Gegenelektrode und der Membran und $w(r=0)$ für die maximale Auslenkung in der Mitte der Membran.

Die Kapazität zwischen der Membran und der unteren Gegenelektrode berechnet sich nach Gl. 8 [7]. Die Herleitung ist in [7] ausführlich beschrieben.

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 * A}{a} - \frac{1}{3} \frac{w(r=0)}{a} \frac{\epsilon_0 * A}{a + w(r=0)} \quad \text{Gl. 8}$$

Die elektrische Beschaltung des Sensors wird durch den ASIC-Chip realisiert. Eine externe Versorgungsspannung VDD wird über einen linearen Spannungsregler in eine interne Versorgungsspannung AVDD umgewandelt. Abbildung 19 zeigt den schematischen Aufbau eines ASIC-Chips für ein MEMS-Mikrofon mit einer Gegenelektrode nach [8].

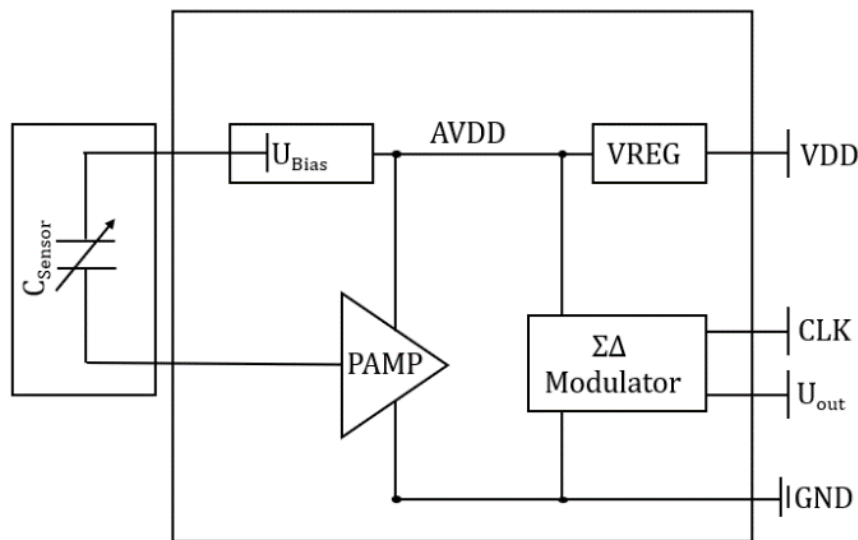


Abbildung 19: Blockschaltbild eines ASIC-Chips nach [8]

Die externe Versorgungsspannung (VDD) wird über einen linearen Spannungsregler (VREG) in eine interne Versorgungsspannung (AVDD) gewandelt. Über eine konstante, elektrische Vorspannung U_{Bias} erfolgt die elektrische Vorladung der Sensorkapazität C_{Sensor} . Der Vorverstärker (PAMP) dient der Signalverstärkung und der Impedanzanpassung. [8]

Der Kondensator des Sensors wird mit einer konstanten, elektrischen Vorspannung U_{Bias} vorgeladen. Unterschiedliche Vorspannungen können durch eine Vervielfachung der Versorgungsspannung, bspw. durch eine Dickson-Ladungspumpe [8], realisiert werden. Die Vorspannungen liegen in der Regel zwischen 9 V und 15 V [13]. Über einen Vorverstärker werden die Signalverstärkung und die Signalanpassung realisiert. Der Vorverstärker verstärkt die vom Sensorchip kommende Wechselspannung. Der Vorverstärker wirkt zudem als Impedanzwandler. Die Funktionsweise des ASICs wird in [8] ausführlicher beschrieben.

2.1.2. Beschreibung der Geräuschunterdrückung

In mobilen Geräten und in modernen Kopfhörern werden MEMS-Mikrofone zur Geräuschunterdrückung (auch: Noise-Cancelling) verwendet. Für die Geräuschunterdrückung werden die Umgebungsgeräusche mithilfe von mehreren MEMS-Mikrofonen, die sich in den Geräten befinden, aufgenommen. Anschließend wird ein gegenphasiges Signal erzeugt, das über die destruktive Interferenz die Störgeräusche auslöscht. Bei der destruktiven Interferenz von Wellen treffen die Wellenberge der Welle 1 auf die Wellentäler der Welle 2 und umgekehrt. Wenn beide Wellen die gleiche Amplitude und die gleiche Frequenz haben, löschen sie sich gegenseitig aus. Dies ist schematisch in Abbildung 20 dargestellt. [14] [15]

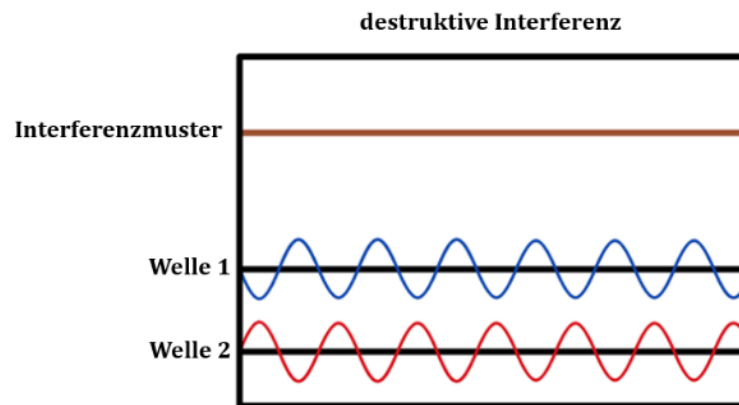


Abbildung 20: Schematische Darstellung der destruktiven Interferenz zweier Wellen [15]
Zwei Wellen mit gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge löschen sich gegenseitig aus, wenn die Wellenberge der Welle 1 auf die Wellentäler der Welle 2 treffen.

Für die Verwendung der MEMS-Mikrofone zur Geräuschunterdrückung ist es wichtig, dass sich die in einem Gerät verwendeten Mikrofone in ihrer Empfindlichkeit nicht zu stark unterscheiden. Die Streuung der Empfindlichkeiten der Mikrofone in einem Fertigungslos muss dafür klein sein. Außerdem dürfen sich die Empfindlichkeiten in der Anwendung nur zueinander wenig verändern. Kritisch sind hier insbesondere Änderungen aufgrund der in dieser Arbeit untersuchten Temperaturhysteresen. [2] [8]

2.1.3. Temperaturhysterese bei Flip-Chip MEMS-Mikrofonen

Die vor einem Temperprozess gemessene Empfindlichkeit (= Ausgangswert) entspricht nicht der nach einem Temperprozess gemessenen Empfindlichkeit. Bei der Empfindlichkeit handelt es sich um einen elektroakustischen Übertragungsfaktor. Die Empfindlichkeit gibt das Verhältnis zwischen der Mikrofonausgangsspannung \tilde{U}_{out} und dem angelegten Schalldruck an (siehe 2.3. und Gl. 15). [16]

Ursache der veränderten Empfindlichkeit ist die Temperaturhysterese der Mikrofone. Nach einer gewissen Zeit geht die Empfindlichkeit wieder näherungsweise auf ihren Ausgangswert zurück. Dies liegt bei den hier verwendeten Mikrofonen daran, dass sich durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturen unter bzw. über der Raumtemperatur mechanische Spannungen aufbauen. Wird das Mikrofon wieder auf Raumtemperatur gebracht, entsteht so ein anderer Spannungszustand als vor der Temperaturbelastung. Aufgrund der Verformung der Lotkugeln ändert sich dabei die Zugspannung der Membran. [17] Dadurch kommt es zu einer Veränderung der Empfindlichkeit nach einem Temperprozess. Die Spannungen bauen sich über die Kriechdehnungen der Lotkugeln nur langsam ab.

Im thermischen Verhalten kommt es zu Veränderungen, da drei verschiedene Materialien mit verschiedenem Materialverhalten miteinander interagieren. Bei den Materialien handelt es sich um das Silizium des MEMS-Chips, die SnAgCu-Legierung (SnAg_{3,8}Cu_{0,7} bzw. kurz SAC 387) der Lotkugeln und die Keramik (HTCC) des Trägersubstrat. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien führen zu unterschiedlichen Spannungszuständen bei verschiedenen Temperaturen. [18]

Die Lotkugeln verbinden das Trägersubstrat (Keramik) mit dem MEMS-Chip und bilden das Ausgleichsmaterial mit Relaxationspotential. Dies liegt daran, dass die Lotkugeln eine geringere Schmelztemperatur haben und im Gegensatz zu den beiden anderen Materialien kriechen. Daher bauen sich die thermisch induzierten Spannungen über die Lotkugeln ab. Kriechfähige Lotmaterialien haben eine spannungsausgleichende Wirkung, vor allem, wenn der Temperaturwechsel langsam stattfindet. Beim Kriechen des Lots kommt es zu sogenannten Rekristallisationszonen innerhalb der

Lotkugel. Dies ist in Abbildung 21 dargestellt. Unter Rekristallisationszonen versteht man Bereiche im Material, die Kriechprozesse durchlaufen haben. Durch das Relaxationsverhalten der Lotkugeln kommt es bei Flip-Chip MEMS-Mikrofonen zu einer Temperaturhysterese nach einer Temperaturbelastung. Die Temperaturhysterese wird in Kapitel 3.3. sowohl über Simulationen als auch über experimentelle Messungen bestimmt. [17] [19]

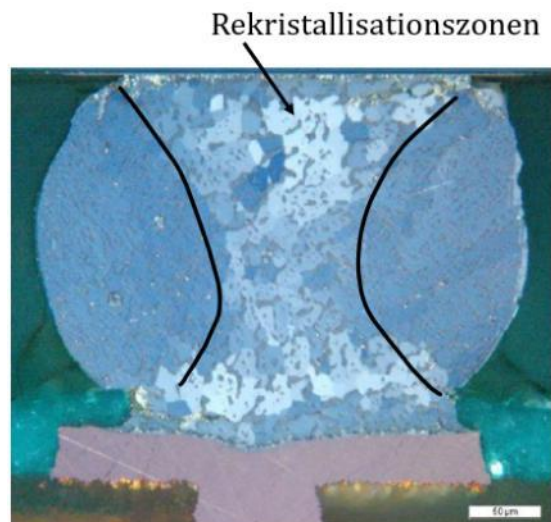


Abbildung 21: Darstellung einer Lotstelle mit Rekristallisationszonen in der Mitte [17]
Für die Abbildung wurde ein Schliff des Mikrofans erstellt. In der Mitte befinden sich die Rekristallisationszonen.

Abbildung 22 zeigt zwei Lotstellen mit den Leiterbahnen in dem Trägersubstrat (HTCC). Diese Darstellung wurde mithilfe eines Computertomographen erstellt [17]. Links in Abbildung 22 ist eine leicht konkave Form der Lotstelle und rechts in Abbildung 22 eine konvexe Form der Lotstelle dargestellt. Für die Form ist nicht nur die Oberflächenspannung des Lotmaterials verantwortlich, sondern auch die Löttemperatur, die Löttdauer oder die Lötmenge könnten einen Einfluss haben.

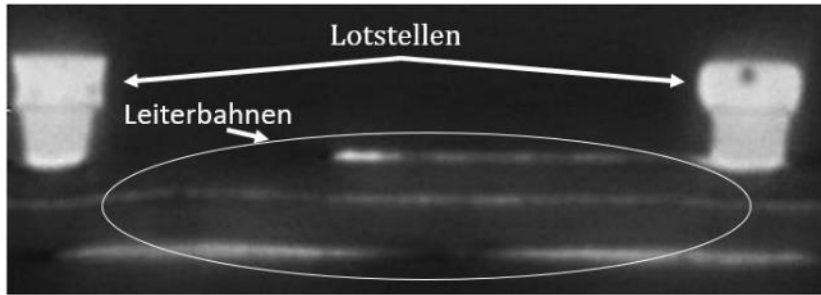


Abbildung 22: CT-Aufnahme von zwei Lotstellen mit leicht unterschiedlicher Ausprägung der Lotstellen [17]

In der CT-Aufnahme sind zwei Lotstellen und die Leiterbahnen zu erkennen.

2.2. Ausbreitung von Schall

Schall wird auch als Schallwelle bezeichnet. Als Schall werden auch die Wellen bezeichnet, die für den Menschen hörbar sind. Bei Schallwellen handelt es sich um Schwingungen. Die Welle des Schalldrucks berechnet sich nach Gl. 9. [14] [20]

$$p(x, t) = p_0 * \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad \text{Gl. 9}$$

Dabei ist p der Schalldruck in Abhängigkeit von Ort x und der Zeit t , p_0 ist die Amplitude der Schallwelle, f ist die Schallfrequenz und λ die Wellenlänge.

Die Frequenz f und die Wellenlänge λ sind über die Schallgeschwindigkeit c gekoppelt, siehe Gl. 10.

$$c = \lambda * f \quad \text{Gl. 10}$$

Die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit in Luft kann mit Gl. 11 näherungsweise berechnet werden.

$$c = 331,5 * \sqrt{\frac{T_{\text{Celsius}} + 273,15}{273,15}} \quad \text{Gl. 11}$$

Im Bereich von -20 bis $+40$ °C kann Gl. 11 vereinfacht werden zu Gl. 12.

$$c = 331,5 + (0,6 * T_{\text{Celsius}}) \quad \text{Gl. 12}$$

Wird die Schallwelle an einem festen Ort betrachtet, ändert sich Gl. 9 zu Gl. 13. Dies entspricht einer Betrachtung um einen Nullpunkt.

$$p(t) = p_0 * \cos(2\pi ft) \quad \text{Gl. 13}$$

Der für den Menschen hörbare Bereich der Schallwellen liegt im Bereich zwischen ca. 16 Hz bis 20 kHz. [14]

Schallwellen im niederfrequenten Bereich (unter ca. 16 Hz) werden auch als Infraschall bezeichnet. Ultraschall, der auch zur Untersuchung von Körpergewebe eingesetzt wird, hat einen Frequenzbereich von ca. 20 kHz bis 1,6 GHz. [14]

2.3. Kenngrößen Mikrofon und Messprinzip

Im Folgenden werden die wichtigsten Kenngrößen, sowie das Messprinzip zur Bestimmung der Empfindlichkeit von MEMS-Mikrofonen vorgestellt.

2.3.1. Kenngrößen von MEMS-Mikrofonen

Die wichtigsten Kenngrößen von MEMS-Mikrofonen sind der Schalldruckpegel, die Empfindlichkeit, der Klirrfaktor und der Rauschabstand.

Schalldruckpegel

Beim Schalldruckpegel (SPL, engl. für sound pressure level) handelt es sich um eine der wichtigsten Bezugsgrößen für MEMS-Mikrofone. Er berechnet sich nach Gl. 14 und wird mit der Einheit Dezibel (dB) angegeben. [21]

$$\text{SPL} = 20 * \log\left(\frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{Ref}}}\right) \quad \text{Gl. 14}$$

Beim Schalldruckpegel wird der an einem bestimmten Ort vorherrschende Effektivwert ($p_{\text{eff}} = p_0/\sqrt{2}$) des Schalldrucks p in das Verhältnis zu einem Referenzdruck p_{Ref} gesetzt. Der Referenzdruck p_{Ref} ist festgesetzt und beträgt $p_{\text{Ref}} = 20\mu\text{Pa} = 2 * 10^{-5} \text{ Pa}$. Dies entspricht in etwa dem kleinsten vom Menschen bei einer Schallfrequenz von $f = 1 \text{ kHz}$ wahrnehmbaren Schalldruck.

Empfindlichkeit

Bei der Empfindlichkeit handelt es sich um einen elektroakustischen Übertragungsfaktor. Sie gibt das Verhältnis zwischen der Mikrofon Ausgangsspannung \tilde{U}_{out} und dem angelegten Schalldruck an. Die Empfindlichkeit kann in Millivolt pro Pascal

angegeben werden, wenn die Ausgangsspannung in Bezug zu einem normierten Schalldruck von $p = 1 \text{ Pa}$ (SPL = 94 dB) gesetzt wird. In der Regel wird die Empfindlichkeit in dBV/Pa angegeben, siehe Gl. 15. [16] [21]

$$\text{Empfindlichkeit} = 20 * \log \frac{\left(\frac{\tilde{U}_{\text{out}}}{1 \text{ V}} \right)}{1 \text{ Pa}} \quad \text{Gl. 15}$$

Klirrfaktor - THD

Der Klirrfaktor (THD, engl. für: total harmonic distortion) ist ein Maß für die harmonischen Verzerrungen eines Systems. Der THD gibt an, wie stark die harmonischen Obertöne im Gesamtsignal vertreten sind und berechnet sich nach Gl. 16. [16]

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n \tilde{u}_i^2}{\tilde{u}_1^2}} * 100 \text{ in \%} \quad \text{Gl. 16}$$

Rauschabstand - SNR

Die Differenz zwischen dem Signalpegel bei einem Schalldruck von einem Pascal und dem Rauschpegel wird als Rauschabstand (SNR, engl. für signal to noise ratio) bezeichnet. [16]

2.3.2. Experimentelle Bestimmung der Empfindlichkeit

In dieser Arbeit wird hauptsächlich die Empfindlichkeit des Mikrofons betrachtet. Die Empfindlichkeit der MEMS-Mikrofone wird in einer Messvorrichtung mit einer Druckkammer bestimmt. Abbildung 23 zeigt den schematischen Messaufbau.

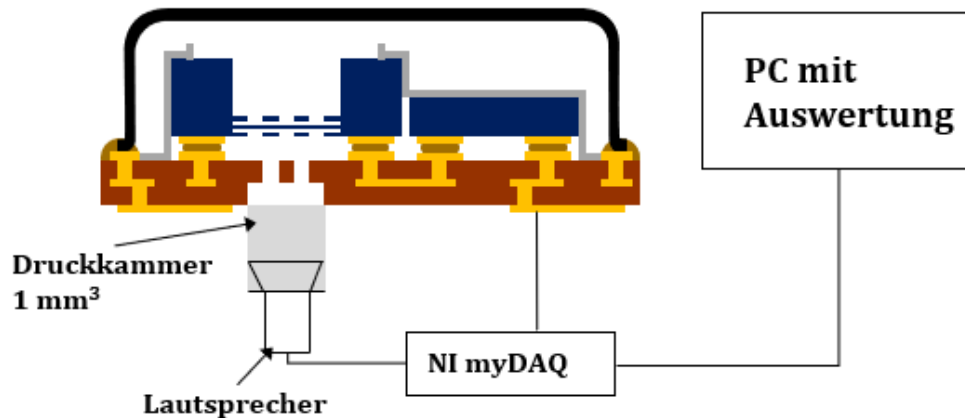


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Messvorrichtung

Das Mikrofon wird an eine Druckkammer angeschlossen und über einen Lautsprecher gelangt eine Schallwelle an die Membran des Mikrofons. Die Spannung wird gemessen und kann über den angeschlossenen PC ausgewertet werden.

Die sehr kleine Druckkammer hat ein Volumen von etwa 1 mm³. Durch den Messaufbau werden die Mikrofone immer unter denselben Bedingungen getestet. Für die Messung wird das Mikrofon in den sogenannten Testjig gegeben. Der Testjig ist eine kombinierte Messapparatur mit einem Lautsprecher, der Druckkammer, der Spannungsversorgung und einer Halterung für das Mikrofon. Dieser ist in Abbildung 24 dargestellt. [17]

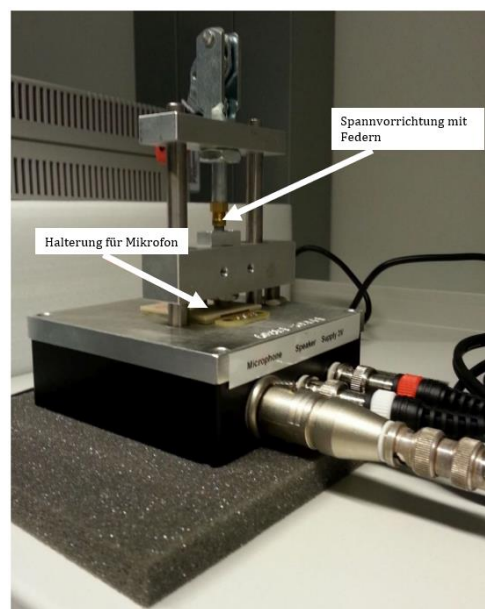


Abbildung 24: Testjig zur experimentellen Bestimmung der Empfindlichkeit des Mikrofons [17]

Das Mikrofon wird in eine Halterung eingegeben und durch die mechanische Spannvorrichtung akustisch verschlossen und elektrisch kontaktiert. Zur Messung trifft eine Schallwelle auf das Mikrofon und die Empfindlichkeit kann detektiert werden.

Das zu messende Mikrofon wird in eine Halterung gegeben, die das Mikrofon mit einer Gummidichtung akustisch abdichtet und so das Mikrofon an die Druckkammer anschließt. Mit Federkontakten werden die notwendigen elektrischen Anschlüsse kontaktiert und das Mikrofon mit Spannung versorgt.

Über einen Analog-Digital/Digital-Analog-Wandler (hier: NI myDAQ) wird eine Verbindung zwischen dem Testjig und einem Notebook hergestellt. Die Software regelt die am Lautsprecher anliegende Spannung. Das erzeugte Signal hat einen Effektivdruck von 1 Pa bei einer Schallfrequenz von 1 kHz. Das Mikrofon detektiert das Drucksignal. Der Analog-Digital-Wandler misst die vom Mikrofon ausgegebene Spannung. [17]

Um den Schalldruck auf 1 Pa einzustellen, wird ein Referenzmikrofon mit einer bekannten Empfindlichkeit eingesetzt. Durch regelmäßige Kontrolle konnte gezeigt werden, dass die Messergebnisse durch das Einlegen und das Entnehmen der Mikrofone kaum beeinflusst werden.

Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden zusätzlich zu den Messungen zur Temperaturhysterese regelmäßig Vergleichsmessungen durchgeführt. Dafür wurden die Vergleichsmikrofone keiner Temperaturbelastung ausgesetzt. Die Standardabweichung bei diesen Messungen beträgt 0,05 dBV/Pa. Die Messungen fanden bei einer konstanten Raumtemperatur von $T = 22,5 \text{ °C}$ statt. Um Temperaturschwankungen im Messlabor aufgrund von Änderungen der Außentemperaturen zu vermeiden, wurden die Messungen in einem klimakontrollierten Reinraum durchgeführt.

Bei den Messungen wird die Empfindlichkeitsänderung bestimmt. Es wird die Differenz zwischen dem Anfangswert der Empfindlichkeit (also vor dem Tempern) und der Empfindlichkeit nach der Temperaturbelastung bestimmt.

Bestimmung der Empfindlichkeitsabweichung in Simulation

In der FEM-Simulation ist es nicht möglich die Empfindlichkeit direkt zu bestimmen, dafür aber die Kapazität. Die Kapazität wird nach Gl. 17 berechnet. [7] Bei der Simulation wird eine Anfangskapazität (\triangleq vor dem Tempern) bestimmt. Dafür wird eine Simulation durchgeführt, bei der zum einen + 1 Pa und zum anderen - 1 Pa auf die Membran wirken. Dies entspricht dem effektiven Schalldruck der Schallwelle, mit der die Empfindlichkeit der Mikrofone gemessen wird. Es wird der effektive Schalldruck verwendet, da in der Berechnung der Kapazitätsänderung die Differenz bestimmt wird. Mithilfe der Simulation wird die Kapazität des Mikrofons bei einem wirkenden effektiven Schalldruck von $p = + 1 \text{ Pa}$ und $p = - 1 \text{ Pa}$ nach Gl. 7 und Gl. 8 bestimmt. Anschließend wird die Differenz dieser beiden Kapazitäten berechnet. Dies wird für jeden Zeitschritt durchgeführt.

Die Kapazitätsänderung zwischen + 1 Pa und - 1 Pa ist proportional zur Empfindlichkeit. Daher kann das logarithmische Verhältnis zwischen der Kapazitätsdifferenz des jeweiligen Zeitschritts und der Anfangskapazitätsdifferenz, siehe Gl. 17, mit der messtechnisch bestimmten Empfindlichkeitsänderung verglichen werden.

$$\text{Kapazitätsänderung} = 20 * \log \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t = 0)} \quad \text{Gl. 17}$$

2.4. Auslenkung von kreisrunden Membranen

In dieser Arbeit spielt die Auslenkung der Membran des Mikrofons eine große Rolle. Die Auslenkung der Membran ist für die Bestimmung der Kapazität von Bedeutung. Daher wird im Folgenden die analytische Lösung zur Bestimmung der Auslenkung vorgestellt. Abbildung 25 zeigt eine kreisrunde, ringsherum eingespannte Membran und deren Auslenkung (Linie), wenn ein Druck p auf diese Membran wirkt. Die Membran lenkt sich in der Wirkrichtung des Drucks aus.

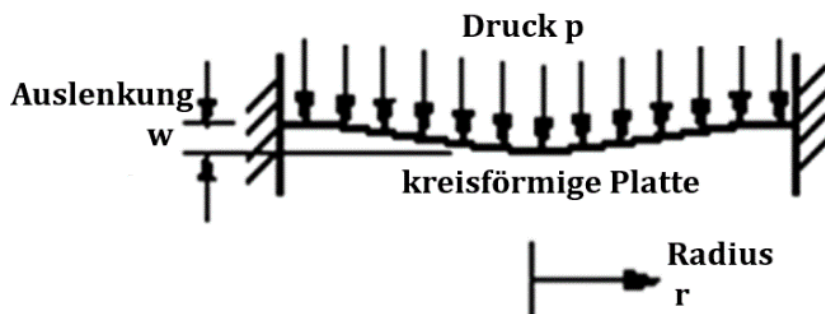


Abbildung 25: Schematische Darstellung einer Membran mit Auslenkung in Wirkrichtung des Drucks [22]

Die Membran mit dem Radius r ist festeingespannt und verformt ($w(r)$) sich in Richtung des wirkenden Drucks p .

Bei der Auslenkung der Membran muss unterschieden werden, ob die Rückstellkraft durch die Zugspannung oder die Biegesteifigkeit verursacht wird. Die mechanische Vorspannung wird bei der Fertigung in die Membran eingebracht, so dass der Abstand zwischen den beiden Gegenelektroden und der Membran gleichbleibt und sich die Membran erst bei einem Schalldruck verformt. Im Folgenden werden die analytischen Lösungen für kreisrunde eingespannte Membranen mit einer Biegesteifigkeit bzw. einer Zugspannung als Vorspannung erläutert.

2.4.1. Auslenkung einer kreisrunden Biegeplatte

Eine kreisrunde Biegeplatte hat eine feste Einspannung am Rand und die Auslenkung dieser ist abhängig von der Biegesteifigkeit. Die Auslenkung einer solchen Biegeplatte berechnet sich nach Gl. 18. [23]

$$w(r) = p * \frac{3 * (1 - \nu^2)}{16Eh^3} * (r^2 - r_0^2)^2 \quad \text{Gl. 18}$$

Dabei steht $w(r)$ für die Auslenkung in Abhängigkeit vom Radius r , p für den vorherrschenden Druck, ν für die Poisson-Zahl des Materials, E für den Elastizitätsmodul (E-Modul), h für die Dicke der Biegeplatte und r_0 für den Gesamtradius der Biegeplatte. Wird nur die maximale Auslenkung in der Mitte betrachtet, vereinfacht sich Gl. 18 folgendermaßen, siehe Gl. 19. [23]

$$w(r=0) = p * \frac{3 * (1 - \nu^2)}{16Eh^3} * r_0^4 \quad \text{Gl. 19}$$

Aus Gl. 18 wird ersichtlich, dass die Auslenkung abhängig von der Biegesteifigkeit des Materials ist. Die Siliziummembran des Mikrofons ($r_0 = 0,56 \text{ mm}$, $h = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$, $E = 163000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,224$) hätte ohne die mechanische Vorspannung bei einem Druck von $p = 1 \text{ Pa}$ einen Wert für die Auslenkung in der Mitte der Membran von $w(r=0) = 0,86 \text{ }\mu\text{m}$.

2.4.2. Auslenkung mit Vorspannung

Die Membran des in dieser Arbeit untersuchten Mikrofons wird bei der Fertigung mechanisch vorgespannt. Dies wird in der Fertigung durch spezielle Temperaturbehandlungen erreicht [24]. Die Auslenkung einer mechanisch vorgespannten Membran ohne Biegesteifigkeit berechnet sich nach Gl. 20. [23]

$$w(r) = \frac{p * r_0^2}{4 * \sigma_{\text{vor}} * h} * \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \quad \text{Gl. 20}$$

Auch hier lässt sich Gl. 20 zu Gl. 21 für die maximale Auslenkung in der Mitte vereinfachen. In dieser Arbeit wird vor allem die Auslenkung in der Mitte der Membran betrachtet. [23]

$$w(r=0) = \frac{p * r_0^2}{4 * \sigma_{\text{vor}} * h} \quad \text{Gl. 21}$$

Auch hier steht $w(r)$ für die Auslenkung in Abhängigkeit vom Radius r , p für den wirkenden Druck, r_0 für den Gesamtradius, h für die Dicke der Membran und σ_{vor} für die mechanische Vorspannung. Nach Gl. 20 ist die Auslenkung für vorgespannte Membranen nicht von der Biegesteifigkeit abhängig. Die Rückstellung wird in diesem Fall von der Zugspannung der Membran verursacht. Bei einer kreisrunden Biegeplatte

wird die Rückstellung durch die Biegefestigkeit verursacht. In Kapitel 3.2. wird der Einfluss der Biegesteifigkeit simulativ berechnet.

2.5. Kriechen

Unter dem Kriechen eines Materials versteht man die plastische Verformung unter Last, die von der Zeit und der Temperatur abhängig ist. Das Kriechen tritt bei metallischen Werkstoffen ab einer Temperatur von etwa 30 % der Schmelztemperatur T_s auf, siehe Gl. 22. [25] [26]

$$T > 0,3 * T_s \qquad \text{Gl. 22}$$

Das Kriechen kann durch die drei Mechanismen – Diffusionskriechen, Versetzungskriechen und Korngrenzengleiten – beschrieben werden. Beim Diffusionskriechen diffundieren Leerstellen entweder entlang der Korngrenze (Coble-Kriechen) oder durch das Kornvolumen (Nabarro-Herring-Kriechen).

Das Versetzungskriechen beschreibt, dass eine Versetzung ein Hindernis bei hohen Temperaturen durch Klettern umgeht. Die Verformungsgeschwindigkeit wird dabei von der Leerstellenstromdichte bestimmt.

Beim Korngrenzengleiten handelt es sich um das Abgleiten von Körnern aneinander. Dieser Mechanismus trägt nur einen geringen Anteil zur Verformung bei. [25] [27]

Die zeitliche Dehnung des metallischen Werkstoffs, die abhängig von der Temperatur und der mechanischen Spannung ist, kann mithilfe eines Zeitdehnungsdiagramms dargestellt werden, siehe Abbildung 26 a. Des Weiteren ist in Abbildung 26 b die Kriechrate (auch Dehnrate) in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Die beiden Graphen in Abbildung 26 sind in drei Abschnitte unterteilt: primäres Kriechen (Bereich I), sekundäres Kriechen (Bereich II) und tertiäres Kriechen (Bereich III). [25] [26] [27]

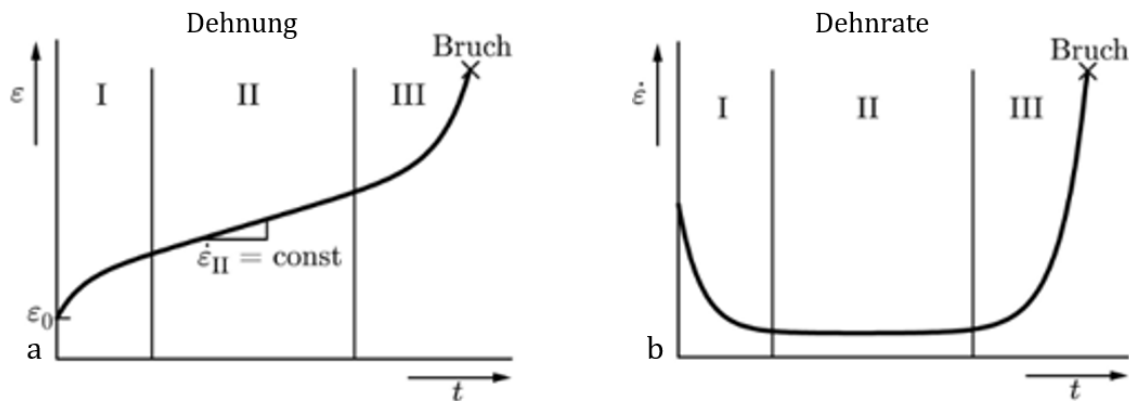


Abbildung 26: Darstellung der Dehnung (links) und der Dehnrate (rechts) in Abhängigkeit der Zeit [28]

Der zeitliche Verlauf der Dehnung und Dehnrate ist mit den drei Abschnitten des Kriechens dargestellt.

Im Bereich des primären Kriechens kommt es bei der Belastung des Bauteils zu einer schnellen Dehnung ϵ_0 . Diese setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen. Es kommt zunächst zu einer hohen Kriechrate. Diese nimmt jedoch aufgrund von Verfestigungsvorgängen im Werkstoff bis zu einem Minimum hin ab.

Im Bereich des sekundären Kriechens ist die Dehnrate näherungsweise konstant. Im Werkstoff herrscht ein dynamisches Gleichgewicht von Verfestigungs- und Entfestigungsvorgängen. Dieser Bereich wird auch als stationärer Bereich bezeichnet. Die Dehnung nimmt etwa linear mit der Zeit zu. [25] [26]

Im Bereich des tertiären Kriechens nimmt die Kriechrate stark zu, bis es zum Bruch des Bauteils kommt. Es kommt zum Bruch, weil massive innere Schädigungen auftreten. Es bilden sich Poren, die zu Rissen zusammenwachsen und den Werkstoff schädigen. Außerdem bilden sich Oberflächenrisse, die durch Gas-Metall-Reaktionen in der oberflächennahen Zone zum Materialversagen beitragen. [25] [26]

In dieser Arbeit wird das sekundäre Kriechen der Lotstellen untersucht. Dieses kann mithilfe von mathematischen Modellen beschrieben werden und wird in dieser Arbeit nach dem Garofalo-Modell berechnet. [25] [26]

2.5.1. Bestimmung der sekundären Kriechrate

Das Kriechen wird vor allem mithilfe von Zeitstandversuchen bestimmt. Dabei wird eine Probe mit konstanter mechanischer Spannung bei konstanter Temperatur belastet. Über einen längeren Zeitraum wird dabei die Dehnung wiederholt gemessen. Für

den Zeitstandversuch werden sogenannte Dogbone-Strukturen verwendet. Abbildung 27 zeigt eine beispielhafte Dogbone-Struktur aus [29].

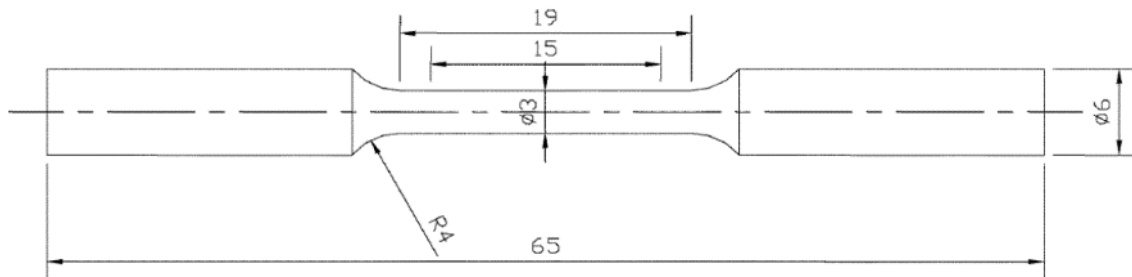


Abbildung 27: Schematische Darstellung einer Dogbone-Struktur für Zeitstandversuch nach [29]

An den Seiten wird die Dogbone-Struktur für den Zeitstandversuch fixiert. An einer Seite wirkt die Kraft, die bewirkt, dass sich die Dogbone-Struktur verformt. Die Verformung wird in Abhängigkeit der Zeit gemessen und so wird die Kriechrate bestimmt.

Während des Zeitstandversuchs wird die Dehnung im mittleren Bereich der Dogbone-Struktur gemessen. Zeitstandversuche haben allerdings den Nachteil, dass sie sehr lange dauern und daher sehr kostenintensiv sind. Sie können bis zu 100 000 Stunden (ca. 12 Jahre) dauern. Es müssen alle Versuchsparameter über einen sehr langen Zeitraum präzise konstant gehalten werden. Für die Bestimmung des Kriechverhaltens müssen mehrere Zeitstandversuche mit unterschiedlichen Spannungen bei konstanter Temperatur durchgeführt werden. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse von Zeitstandversuchen dargestellt. Die Zeitstandversuche wurden bei unterschiedlichen Temperaturen für unterschiedliche Spannungen durchgeführt. [30]

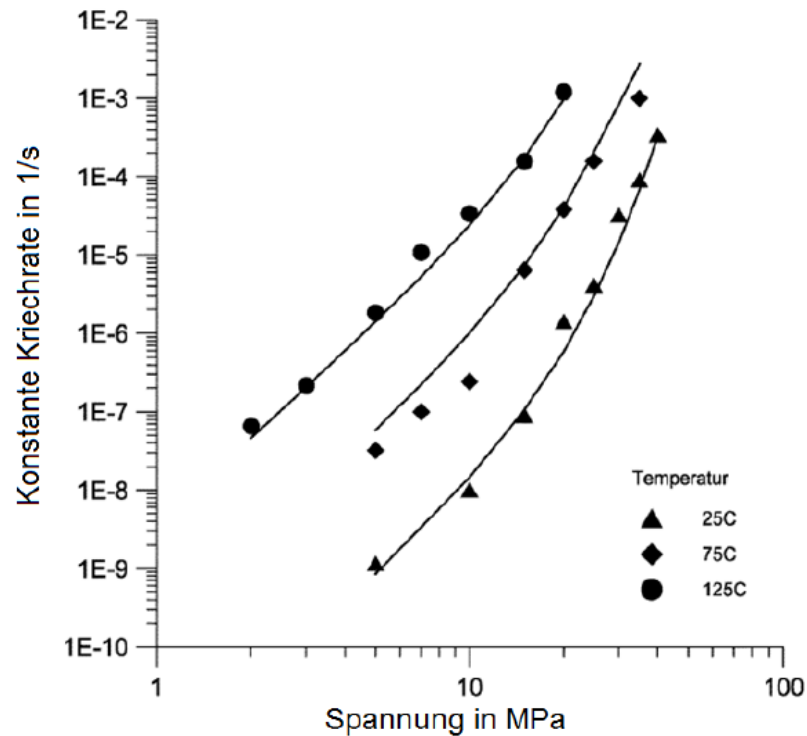


Abbildung 28: Ergebnisse von Zeitstandversuchen für die Bestimmung der Kriechrate [29] Aufgetragen ist die Kriechrate in Abhängigkeit der Spannung. Die experimentellen Messungen (Punkte) werden aufgetragen und anschließend wurde hier ein mathematischer Fit nach dem Garofalo-Modell (durchgezogene Linie) erstellt.

Für die Bestimmung der Kriechrate aus den experimentellen Messungen wurde ein mathematischer Fit für ein bekanntes Kriechmodell angewandt. Der Fit ist als durchgezogene Linie in Abbildung 28 dargestellt. In diesem Fall wurde das Garofalo-Modell verwendet. [29] [31]

Das Garofalo-Modell hat die folgende Grundgleichung, siehe Gl. 23.

$$\dot{\varepsilon} = C_1 * (\sinh(C_2 * \sigma))^{C_3} * \exp\left(\frac{-C_4}{R * T}\right) \quad \text{Gl. 23}$$

Dabei steht $\dot{\varepsilon}$ für die Kriechrate, $C_1 - C_4$ für empirisch bestimmte Koeffizienten, σ für die Spannung, R für die allgemeine Gaskonstante und T für die Temperatur in Kelvin. Die Bestimmung der Kriechrate für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wird in Kapitel 3.4. erläutert.

2.6. Simulationsumgebung Code-Aster

In dieser Arbeit werden die Simulationen mit der Free- and Open-Source Software Code-Aster durchgeführt. Bei Code-Aster handelt es sich um ein Linux-basiertes Simulationsprogramm der französischen Elektrizitätsgesellschaft Electricite de France SA – EDF [32]. Da es sich um eine Free and Open-Source Software handelt, ist sie für jeden kostenlos zugänglich. Der Vorteil von Code-Aster gegenüber anderen nicht-kommerziellen Simulationsprogrammen ist, dass das Programm sehr gut validiert ist [32]. Es gibt sowohl einen Katalog mit umfangreichen Dokumentationen als auch umfassende Testbeispiele [32]. Das Aufsetzen der einzelnen Simulationsschritte erfolgt hauptsächlich skriptbasiert (siehe Anhang A und Anhang B)

2.7. Grundlagen zur Finiten Elemente Methode

Das allgemeine Vorgehen für eine FEM-Simulation ist in Abbildung 29 dargestellt. Die FEM-Simulation wird angewendet, wenn es zu aufwändig ist klassische Methoden anzuwenden. Bei der FEM-Simulation werden komplexe Strukturen in endlich viele Teile unterteilt, die dann mit bekannten Funktionen gut mithilfe eines Computers berechnet werden können. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend genauer betrachtet, siehe 2.7.1. bis 2.7.5. In [33], [34], [35] wird das Vorgehen für eine FEM-Simulation detailliert beschrieben.

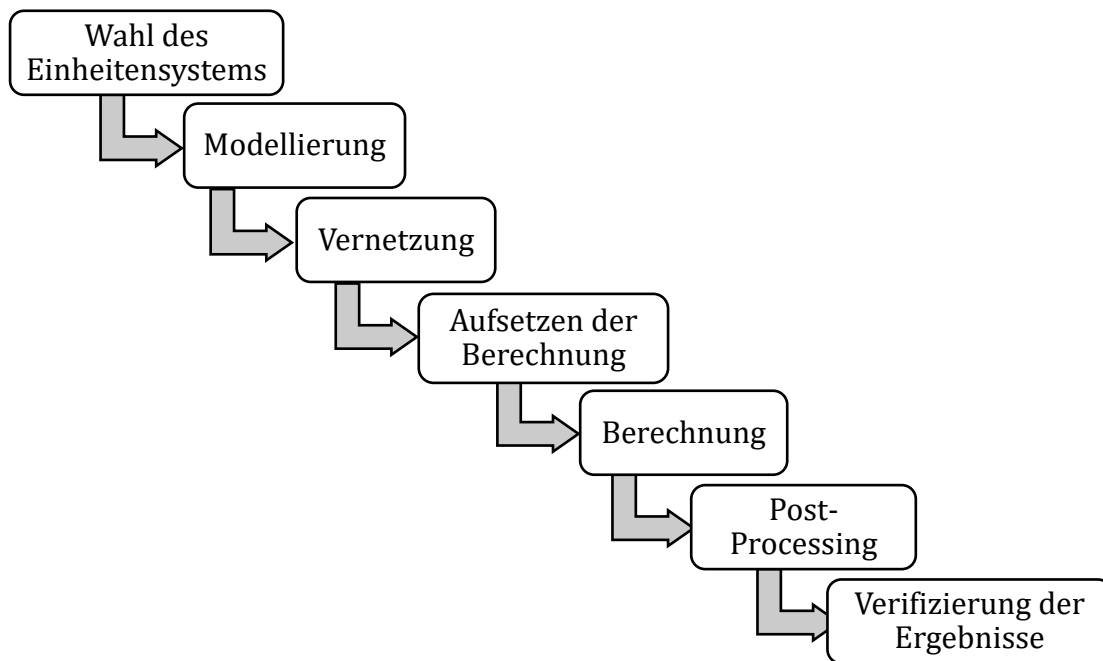


Abbildung 29: Allgemeines Vorgehen für eine Simulation unabhängig vom spezifischen Programm

Die einzelnen Schritte bauen aufeinander auf. Nach der Wahl des Einheitensystems kann die Modellierung und Vernetzung durchgeführt werden. Dann wird die Berechnung aufgesetzt und durchgeführt. Anschließend erfolgen das Post-Processing und die Verifizierung der Ergebnisse.

Die einzelnen Schritte werden im Weiteren genauer beschrieben. Wie die Herangehensweise in der Simulationsumgebung Code-Aster ist, wird in Kapitel 3.1. detailliert erläutert.

2.7.1. Einheitensystem

Da Simulationsprogramme prinzipiell einheitenlos arbeiten, muss im ersten Schritt vom Nutzer ein konsistentes Einheitensystem gewählt werden. Alle physikalischen Größen lassen sich durch die Basisgrößen – Länge, Masse, Zeit, Temperatur und elektrische Stromstärke – darstellen. Die weiteren physikalischen Größen sind eine Kombination aus diesen fünf Basisgrößen. So berechnet sich bspw. der Druck aus den drei Basisgrößen Länge, Masse und Zeit (z. B. $1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$). Aufgrund dessen müssen zu Beginn einer numerischen Simulation nur die Einheiten und Dimensionen dieser Basisgrößen gewählt werden. In [36] und [37] sind Einheitensysteme für die numerische Simulation dargestellt.

Das am meisten verwendete Einheitensystem hat bei den Basisgrößen die in Tabelle 1 dargestellten Einheiten und wird auch als Einheitensystem ‚mm-tonne-s‘ bezeichnet. In dieser Arbeit wird mit dem Einheitensystem nach Tabelle 1 gerechnet.

Tabelle 1: Einheiten des Einheitensystems ‚mm-tonne-s‘

Basisgröße	Formelzeichen	Einheit
Länge	l	mm (Millimeter)
Masse	m _{masse}	tonne (Tonne)
Zeit	t	s (Sekunde)
Temperatur	T	K (Kelvin)
elektrische Stromstärke	I	Ampere (Ampere)

Falls Strukturen mit größeren oder kleineren Werten berechnet werden sollen, ist es notwendig das Einheitensystem dementsprechend anzupassen, soweit auf die Konsistenz geachtet wird. Die Wahl des Einheitensystems hat unter anderem Einfluss auf die Vernetzung, aber auch auf die Rechendauer der Simulation haben. Diese beiden Punkte können die Genauigkeit der Simulation stark beeinflussen, siehe [33].

2.7.2. Modellierung - Erstellen der Geometrie

Da bei der Simulation geometrische Modelle physikalisch betrachtet werden, ist es zunächst notwendig diese digital zu beschreiben. Bei zusammengesetzten Strukturen ist es bei der Modellierung meistens schon möglich Gruppen bzw. Kontaktflächen zu beschreiben. Gruppen müssen definiert werden, um zum einen Randbedingungen wie Freiheitsgerade oder das Wirken einer Kraft bzw. eines Druckes zuordnen zu können und zum anderen, um bei zusammengesetzten Strukturen die unterschiedlichen Materialeigenschaften den Gruppen zuordnen zu können. Kontaktflächen sollten definiert werden, damit bei zusammengefügt Strukturen diese auch wirklich zusammengehörig sind und nicht lose sind. Außerdem wird es so für die Vernetzung einfacher gemacht die Kontaktflächen Knoten auf Knoten zu vernetzen. Für die Erstellung des geometrischen Modells können entweder CAD-Programme verwendet werden, aus denen das Modell dann für den weiteren Verlauf importiert werden kann oder es können Geometrie-Module verwendet werden, die in den meisten Simulationsprogrammen integriert sind.

Bestimmung von Randbedingungen

Bei der numerischen Simulation muss das System kinematisch bestimmt sein. Über die Randbedingungen werden Lagerungspunkte definiert. Außerdem werden über Randbedingungen auch das Wirken von Kräften, Drücken oder Verschiebungen angegeben.

2.7.3. Vernetzung

Für eine Simulation muss das geometrische Modell vernetzt werden. Dies wird gemacht, um das geometrische Modell in einfache Teilgebiete mithilfe von Knotenpunkten zu unterteilen. Dadurch kann auf die Teilgebiete ein numerisches Verfahren angewendet werden. Mithilfe von Differentialgleichungen kann dann das über die Randbedingungen angegebene Problem berechnet und gelöst werden.

Die vorher bestimmte geometrische Struktur wird nun durch ein Netz an Knotenpunkten dargestellt. Sie wird hierbei in kleine Elemente unterteilt, die an gemeinsamen Knotenpunkten miteinander verbunden sind.

Ein 1D-Modell wird in Knotenpunkten und Linien unterteilt. Für ein 2D-Modell gibt es die Möglichkeit mit Knotenpunkten und Dreiecken oder mit Knoten und Vierecken zu vernetzen. 3D-Modelle können entweder mithilfe von Knotenpunkten und Tetraedern (auch unstrukturierte Vernetzung bzw. engl. unstructured mesh) oder mithilfe von Knotenpunkten und Hexaedern (auch strukturierte Vernetzung bzw. engl. structured mesh) vernetzt werden. [38]

In dieser Arbeit werden die Simulationen mit der unstrukturierten Vernetzung durchgeführt. In Kapitel 3.3. wird auf die Problematik der strukturierten Vernetzung bei dem MEMS-Mikrofon eingegangen.

Wie in 2.7.2 erwähnt, werden Kontaktflächen für die Vernetzung definiert. Dies ist nötig, damit die Kontaktflächen Knoten auf Knoten vernetzt werden können. So haben sich berührende Flächen dieselbe Knotenverteilung. Allgemein gilt für die Vernetzung der folgende Kompromiss: So grob wie möglich, so fein wie nötig. Dies bedeutet, dass relevante Bereiche feiner vernetzt werden sollten. [34] [39]

2.7.4. Aufsetzen der Berechnung

Nachdem das geometrische Modell erstellt und vernetzt wurde, müssen noch die für die Berechnung benötigten Prozess-Parameter, wie Eigenschaften der Materialien, wie z.B. E-Modul, Poisson-Zahl, Temperaturkoeffizient, Kriechverhalten, Randbedingungen und die gewünschte Darstellung der Ergebnisse definiert werden. Dann kann die Berechnung gestartet werden.

2.7.5. Post-Processing – Darstellung der Ergebnisse

Die Visualisierung der Ergebnisse kann mithilfe eines separaten Programms erfolgen, falls dies nicht direkt im Simulationsprogramm möglich ist.

Nachdem die Simulation erfolgreich durchgeführt worden ist, muss überprüft werden, ob das Ergebnis realistisch ist oder nicht. Falls eine Simulation allerdings nicht fehlerfrei durchgeführt werden konnte, muss eine Fehlerdiagnose durchgeführt werden. Häufige Probleme sind, dass die Berechnungsdatei nicht richtig aufgesetzt worden ist oder nicht genug Festplattenspeicher oder Arbeitsspeicher freigegeben wurde. In den meisten Fällen werden Fehlerursachen vom Programm erkannt und in einer separaten Datei angegeben.

Verifizierung der Ergebnisse

Um Berechnungen mithilfe der finiten Elemente Methode zu verifizieren, können diese zum einen mit einer analytischen Lösung und zum anderen über eine sogenannte Netzkonvergenzstudie überprüft werden.

Bei dem Vergleich mit einer analytischen Lösung ist zu beachten, dass verschiedene Faktoren das Ergebnis der finiten Elemente Lösung beeinträchtigen können. So kann es zu Abweichungen zwischen dem analytischen Ergebnis und dem Simulationsergebnis kommen. Mögliche Fehlerquellen sind u.a. Rundungsfehler aufgrund der Genauigkeit des verwendeten Computers und Lösungsfehler in der Nachbildung des Materialverhaltens, wie z. B. das Kriechen an jedem einzelnen Knotenpunkt. Allerdings kann man den Vergleich mit der analytischen Lösung nur anwenden, wenn eine analytische Lösung bekannt und sinnvoll ist. Andererseits werden FEM-Simulationen meistens dann angewendet, wenn eben keine analytische Lösung möglich ist. Bei der

Verifizierung mit einer analytischen Lösung kann man allgemein überprüfen, ob das Simulationsprogramm realistische und glaubhafte Ergebnisse liefert. [40]

Für kompliziertere Simulationen ist die Verifizierung nur mit einer Netzkonvergenzstudie möglich. Dafür wird die Feinheit des Netzes schrittweise erhöht. Bei der Simulation führen engmaschigere Netze zu genaueren Lösungen. Die Verfeinerung des Netzes führt zu einer Erhöhung der Berechnungszeit. An den Ergebnissen der Netzkonvergenzstudie kann man erkennen, ob und auf welchen (End-)Wert das Ergebnis konvergiert. [41]

3. Ergebnisse

3.1. Simulation einer vorgespannten Membran in der Simulationsumgebung Code-Aster

Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise für Simulationen in der Umgebung von Code-Aster anhand eines Beispiels erläutert.

Vorgehensweise in der Simulationsumgebung Code-Aster

In Abbildung 30 ist schematisch dargestellt, welche Schritte zum Erstellen einer Simulation gebraucht werden und mit welchen Programmen dabei gearbeitet wird.

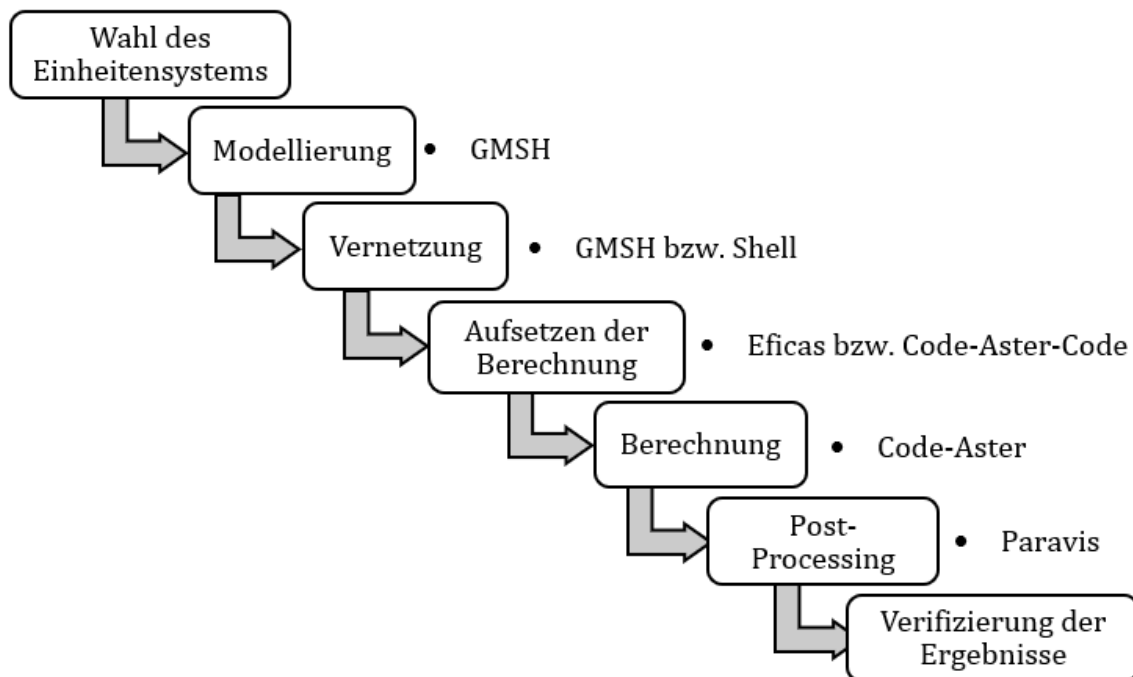


Abbildung 30: Allgemeines Vorgehen für eine Simulation mit den verwendeten Programmen in der Simulationsumgebung Code-Aster

Die Schritte bauen aufeinander auf und können mit den genannten Programmen durchgeführt werden.

Als Beispiel soll die Auslenkung einer vorgespannten Siliziummembran berechnet werden. Auf die Membran des Mikrofons soll ein Schalldruck von $p = 1 \text{ Pa}$ wirken. Die Membran ist mit $\sigma_{\text{vor}} = 50 \text{ MPa}$ vorgespannt und hat einen Radius von $r = 0,56 \text{ mm}$ und eine Dicke von $h = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Wahl des Einheitensystems

Die Simulation werden mit dem Einheitensystem „mm-tonne-s“ durchgeführt, siehe Tabelle 1.

Erstellen der Geometrie

In 2.7.2 wurde beschrieben, dass für jede Simulation zunächst ein geometrisches Modell erstellt werden muss. In der vorliegenden Arbeit wurden die Modelle mit dem Programm GMSH erstellt [42]. Innerhalb von GMSH kann das geometrische Modell mithilfe eines Textcodes generiert werden. In Anhang A ist der Textcode für die Modellierung der Siliziummembran dargestellt.

Der Textcode ist folgendermaßen aufgebaut:

Zur Beschreibung der Geometrie werden zunächst die benötigten Punkte definiert. Dann können die Punkte durch Linien miteinander verbunden werden. Für 2D- und 3D-Modelle werden im nächsten Schritt Oberflächen definiert. Um Oberflächen erstellen zu können, müssen zuerst sogenannte Line Loops definiert werden. Durch Line Loops werden die Linien, die zusammen eine Oberfläche bilden, miteinander verbunden. Erst danach können die Oberflächen generiert werden. Für 3D-Modelle muss in einem weiteren Schritt das Volumen bestimmt werden. Um ein Volumen erstellen zu können, müssen dazu sogenannte Surface Loops definiert werden. Diese sind vergleichbar mit Line Loops bei Oberflächen. Dann kann das Volumen festgelegt werden und die Erstellung des Modells ist fertig. Im Anschluss werden über die Befehle Physical Point/Surface oder Physical Volume die für die späteren Berechnungen notwendigen Randbedingungen konkretisiert. Der Textcode hat den Vorteil, dass mögliche Geometrievariationen leichter und auch automatisiert erstellt werden können. Es wäre auch möglich eine grafische Benutzeroberfläche zu erstellen, in der der Textcode implementiert ist und spätere Änderungen leicht vorgenommen werden können.

Das grafische Ergebnis für den geometrischen Textcode der Membran ist in Abbildung 31 a dargestellt. Um eine gleichmäßige Vernetzung (siehe Abbildung 31 b) zu gewährleisten, ist die Membran mithilfe von Kreisringen unterteilt worden.

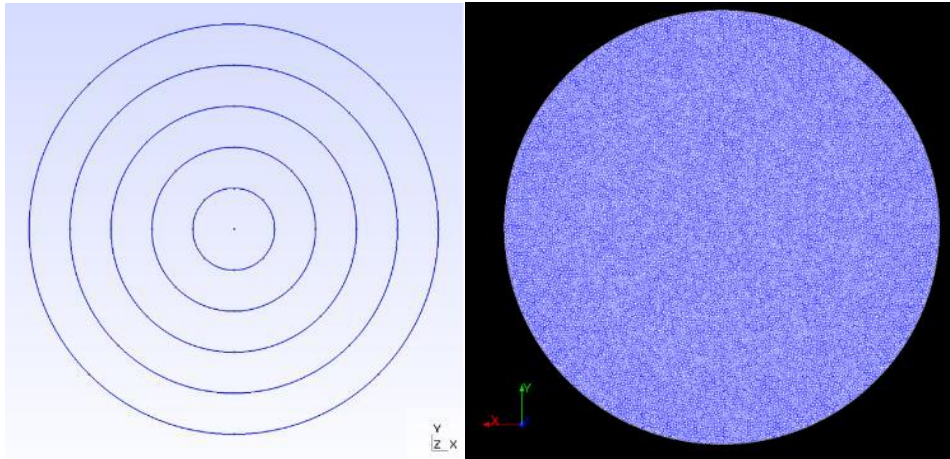


Abbildung 31: Geometrisches Modell der Siliziummembran (a) und Vernetzung der Membran (b)

Für eine gleichmäßige Vernetzung der Siliziummembran wurden Kreisringe gewählt. Durch die gleichmäßige Vernetzung kann ein gutes Ergebnis der Verformung erreicht werden

Vernetzung

Auch für die Vernetzung wird das Programm GMSH verwendet. Um eine Vernetzung mit GMSH durchzuführen, gibt es zwei Möglichkeiten – zum einen über die grafische Benutzeroberfläche und zum anderen über das Linux-Terminal [42]. In beiden Fällen kann für eine feinere oder gröbere Vernetzung im Textcode der Geometrie der Befehl Transfinite Line verwendet werden. Hierbei wird die Anzahl der Punkte pro Linie definiert. Dies eignet sich vor allem für Geometrien, die aus mehreren Volumina zusammengesetzt werden. In dieser Arbeit wird die Vernetzung über den Linux-Terminal durchgeführt. Der Befehl für diese Vernetzung ist in Abbildung 32 dargestellt.

```

simpc@simpc: ~
Datei Bearbeiten Ansicht Suchen Terminal Hilfe
simpc@simpc:~$ gmsh -3 -clscale 0.05 '/home/simpc/Daten/SimulationVerformungMembran/Membran.geo' -o '/home/simpc/Daten/SimulationVerformungMembran/Membran.med'

```

Abbildung 32: Befehl für Vernetzung im Linux-Terminal

Durch die Verwendung des Linux-Terminals ist es möglich die Modellierung und die Simulation zu automatisieren.

Dabei steht ‚gmsh‘ dafür, dass das Programm GMSH verwendet wird, ‚clscale‘ für den global mesh size factor, ‚float‘ für eine beliebige Dezimalzahl, ‚-3‘ für den Modelltyp 3D. Dann wird der Dateipfad der vorher erstellten Geometriedatei angegeben und über den Befehl mit ‚-o‘ mit dem dazugehörigen Dateipfad als vernetzte ‚*.med-Datei‘ gespeichert. Abbildung 33 zeigt einen Vergleich zwischen einer grob vernetzten (Abbildung 33 a) und einer fein vernetzten (Abbildung 33 b) Geometrie der Siliziummembran.

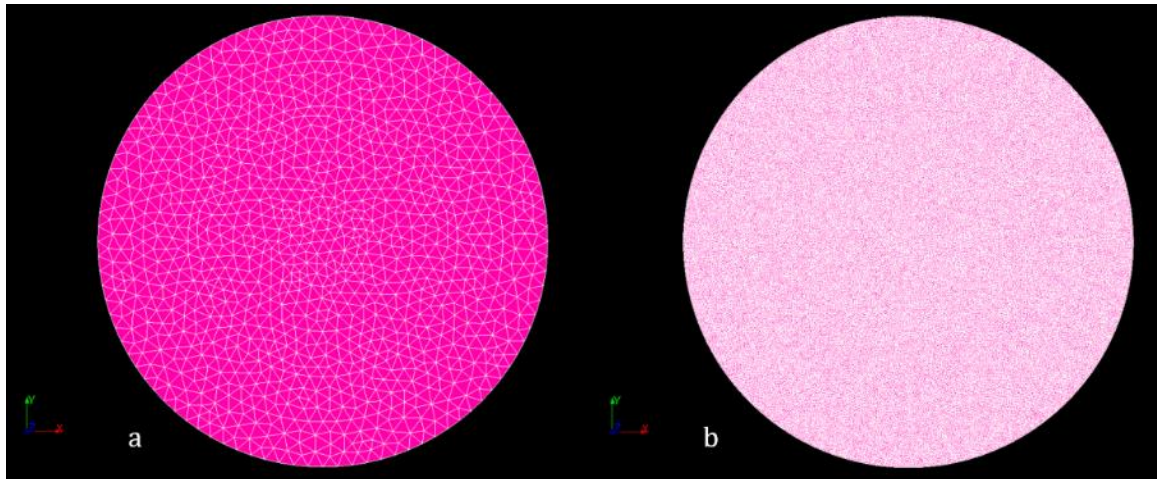


Abbildung 33: Vergleich zwischen einer grob vernetzten und einer fein vernetzten Geometrie der Siliziummembran

Links sind die Tetraeder der Vernetzung noch zu erkennen, rechts ist die Anzahl der Tetraeder so hoch, dass sie nicht mehr alle einzeln erkennbar sind. Mit der Zunahme der Anzahl der Tetraeder kann das Ergebnis der Simulation genauer werden, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Falls die Vernetzung zu grob ist oder allgemein eine Netzkonvergenzstudie durchgeführt werden soll, muss im Linux-Terminal nur der global mesh size factor verändert werden. Erfahrungsgemäß liefert ein global mesh size factor von 0,05 schon ein gutes erstes Ergebnis. Wenn das geometrische Modell vernetzt worden ist, fehlt für die Simulation zunächst noch die Berechnungsdatei, in der formuliert werden soll, was als Ergebnis ausgegeben werden soll.

Aufsetzen der Berechnungsdatei

Die Berechnungsdatei wird ebenfalls mithilfe eines Textcodes generiert. Ein beispielhafter Textcode für die Berechnungsdatei befindet sich in Anhang B.

Zuerst werden die Materialeigenschaften angegeben. Dann wird die erstellte Vernetzungsdatei eingelesen und die Materialeigenschaften auf diese übertragen. Anschließend wird in der Berechnungsdatei angegeben, um welche Modellart (1D, 2D oder 3D) es sich handelt. Im nächsten Schritt werden die Randbedingungen für die Simulation bestimmt. Die Randbedingungen müssen die gleichen Bezeichnungen haben wie in der Geometrie- bzw. Vernetzungsdatei. Sonst kann im Simulationsprogramm nicht auf diese zurückgegriffen werden. Danach müssen die simulationsspezifischen Operatoren für die Simulation gewählt werden. Dann muss angegeben werden, welche physikalischen Größen berechnet werden sollen. Im letzten Schritt wählt der Nutzer die physikalischen Größen aus, die in der Ergebnisdatei dargestellt werden sollen.

Aufgrund der eingegebenen und für die Ergebnisdatei ausgewählten Daten, berechnet das Simulationsprogramm die Ergebnisse. Für den Rechenweg gibt es im Programm interne Bibliotheken.

Für die hier vorgestellte Simulation werden die folgenden Bedingungen als Eingabeparameter angenommen:

Es handelt sich um eine Siliziummembran mit einem E-Modul von $E = 163\,000\text{ MPa}$ und einer Poisson-Zahl $\nu = 0,224$. Die Membran ist mit 50 MPa mechanisch vorgespannt. Der Rand der Membran ist fixiert. Dies ergibt sich durch die Einspannung in den Siliziumrahmen. Auf die Unterseite der Membran soll ein Druck von $p = 1\text{ Pa}$ wirken. Als Ergebnis soll die Auslenkung der Membran dargestellt werden. Nachdem die Berechnungsdatei erstellt worden ist, kann die Simulation durchgeführt werden.

Post-Processing – Darstellung der Ergebnisse

Als Resultat einer ersten Simulation verformt sich die vorgespannte Siliziummembran um $2,8\text{ nm}$. Nach der analytischen Lösung (siehe Gl. 21) verformt sich diese Siliziummembran mit $r = 0,56\text{ mm}$, $h = 0,5\text{ }\mu\text{m}$ und $\sigma_{\text{vor}} = 50\text{ MPa}$ bei einem Druck von 1 Pa um $3,16\text{ nm}$. Vergleicht man dies mit dem Ergebnis der Simulation, ergibt sich eine Abweichung von ca. $11,2\%$ für das Ergebnis der Simulation im Vergleich zur analytischen Berechnung. Um das Ergebnis der Simulation zu verifizieren, wurde eine Netzkonvergenzstudie mit unterschiedlichen Feinheiten des Netzes durchgeführt. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 34 dargestellt.

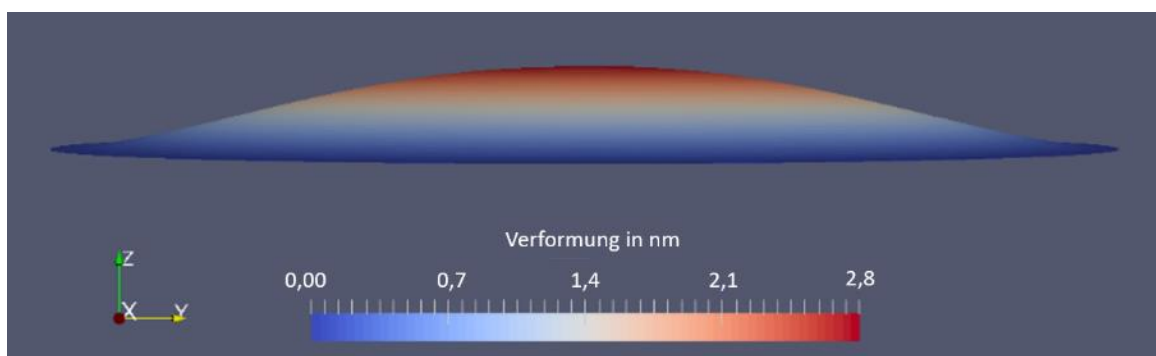


Abbildung 34: Ergebnis der ersten Simulation

Die Membran ist mit $\sigma_{\text{vor}} = 50\text{ MPa}$ vorgespannt und der Druck $p = 1\text{ Pa}$ wirkt von unten auf die Membran. Sie verformt sich in Wirkrichtung des Drucks um $2,8\text{ nm}$.

Verifizierung des Simulationsergebnisses

Eine experimentelle Bestimmung der Auslenkung der Membran wäre extrem schwierig. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung von Simulationsergebnissen sind Netzkonvergenzstudien. Diese können für jede Art von Simulationen angewendet werden. Dies hilft auch, wenn analytische Lösungen nicht bekannt bzw. nicht möglich sind. Für Netzkonvergenzstudien werden mehrere Simulationen durchgeführt, wobei die Anzahl der Elemente der Vernetzung schrittweise erhöht wird. Dabei steigt die Genauigkeit des Ergebnisses und man kann abschätzen zu welchem Wert das Ergebnis konvergiert.

Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Netzkonvergenzstudie. Die Berechnungen für Netzkonvergenzstudien dauern insgesamt relativ lange. Die Simulation liefert für die Auslenkung einen Wert von $w(r) = 2,9 \text{ nm}$. Dies entspricht einer Abweichung von ca. 7,9 % im Vergleich zur analytischen Berechnung. Damit ist gezeigt, dass die Simulation realistische Ergebnisse liefert. Die Abweichung kann dadurch erklärt werden, dass bei der Simulation die Biegesteifigkeit und die feste Einspannung der Siliziummembran berücksichtigt werden, siehe Kapitel 3.2.

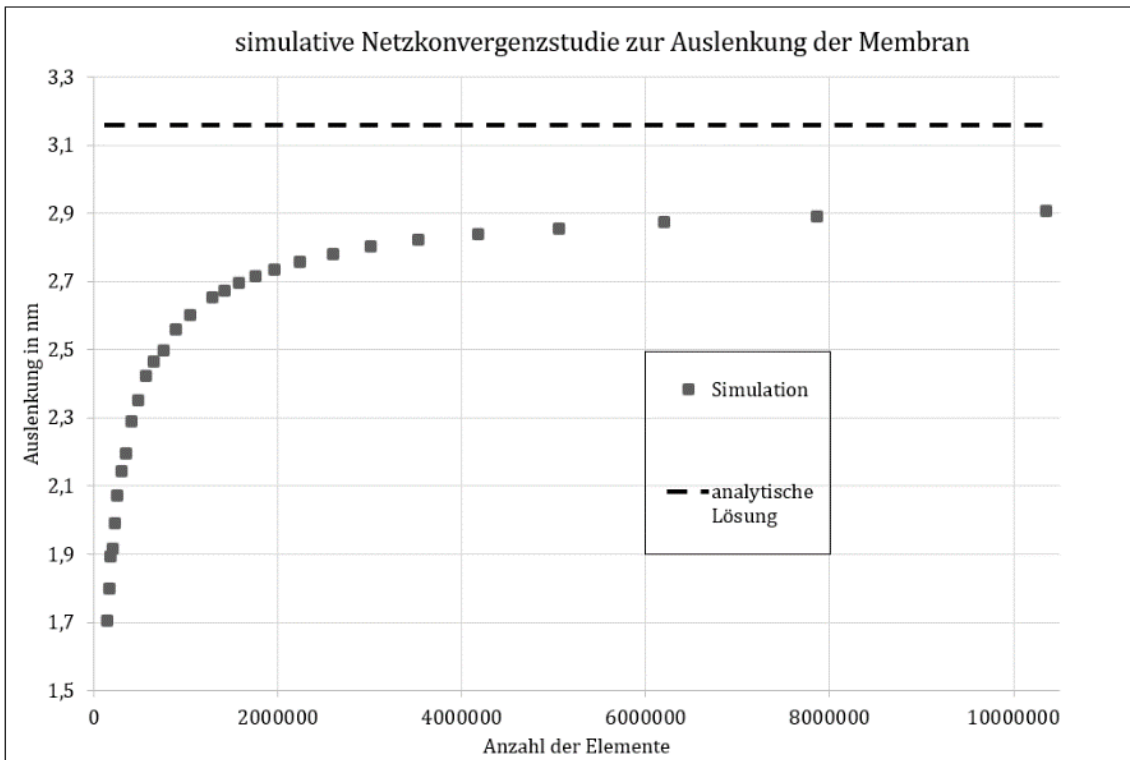


Abbildung 35: Ergebnis der Netzkonvergenzstudie
Mit der Anzahl der Elemente in der vernetzten Struktur erhöht sich hier auch das Ergebnis der Simulation, bis es zu einer Konvergenz kommt.

Die Berechnungsdauer steigt bei der feineren Vernetzung extrem an. Im hier beschriebenen Beispiel wurde für die Einzelsimulation mit der höchsten Anzahl an Tetraedern (ca. 10,3 Mio.) 18924 Sekunden (ca. 5,25 hStunde) lang gerechnet. In Abbildung 36 ist für die Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie (siehe Abbildung 35) die Berechnungsdauer dargestellt.

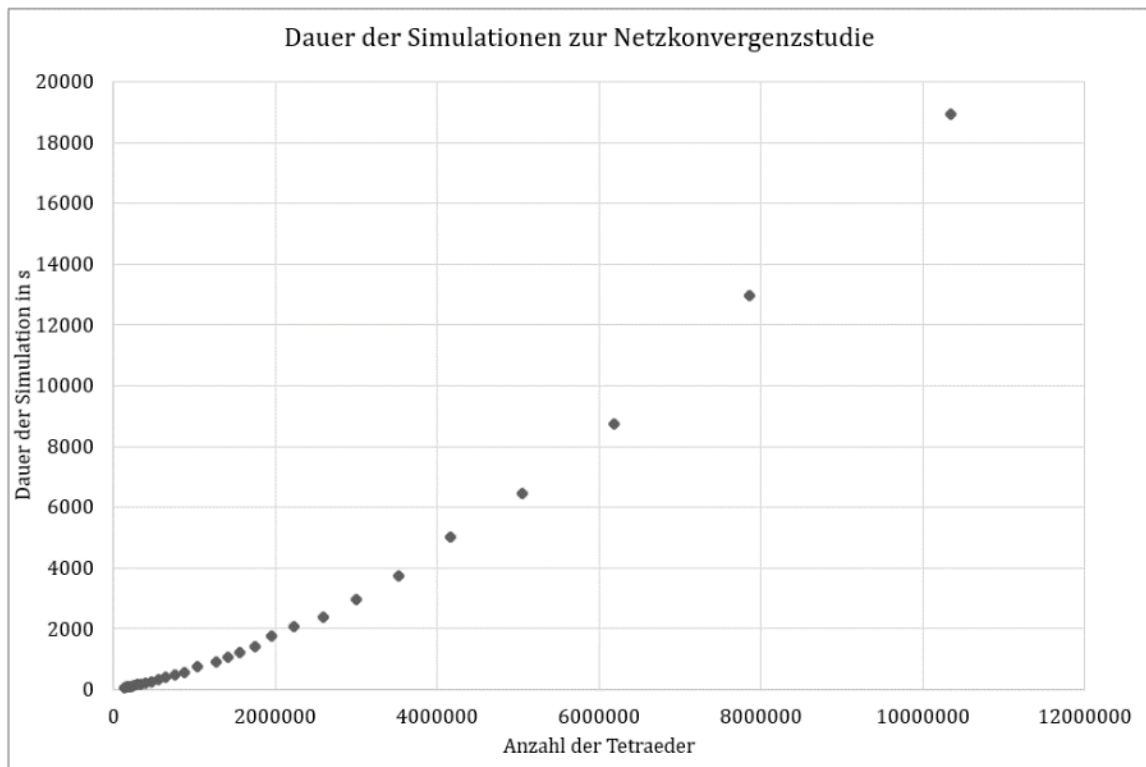


Abbildung 36: Berechnungsdauer der Simulationen aus Abbildung 35
Die Berechnungsdauer wird länger, je höher die Anzahl der Tetraeder der vernetzten Struktur ist.

In Abbildung 35 wurde gezeigt, dass der Konvergenzwert der Auslenkung für die Siliziummembran bei $w(r) = 2,9 \text{ nm}$ liegt. Erst bei einer Einzelsimulation mit ca. 10,3 Mio. Tetraedern wird dieses Ergebnis erreicht. Die Dauer dieser Simulation ist mit ca. 5,25 Stunden (18924 s) allerdings sehr hoch. Deshalb wurde für diese Arbeit entschieden, für weitere Simulationen kürzere Berechnungszeiten zu benutzen, die noch ein glaubwürdiges und zielführendes Ergebnis erreichen.

Im hier gezeigten Beispiel ergibt die Simulation mit ca. 3,5 Mio. Tetraedern nach einer Berechnungszeit von 3758 s (ca. 1 h_{Stunde}) einen Wert für die Auslenkung der Membran von $w(r) = 2,82 \text{ nm}$. Das ist ein guter Kompromiss von Berechnungszeit und Genauigkeit. Die Abweichung gegenüber dem konvergierten Wert der Auslenkung von $w(r) = 2,9 \text{ nm}$ beträgt 2,75 %.

3.2. Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Auslenkung der Siliziummembran

In Kapitel 2.4.2. wurde mit Gl. 20 nach [23] beschrieben, dass die Biegesteifigkeit des Materials keinen Einfluss auf die Auslenkung einer mechanisch vorgespannten Membran hat und die Rückstellung von der Zugspannung der Membran verursacht wird. Nachfolgend wird mithilfe von Simulationen untersucht, ob die Biegesteifigkeit doch einen Einfluss auf die Auslenkung der Membran hat. Dafür wurde mithilfe der Simulationssoftware die Abhängigkeit der Auslenkung der Membran vom E-Modul und von der Poisson-Zahl untersucht.

In den Simulationen wurden die Werte des E-Moduls zwischen 1 GPa (E-Modul-Wert von Polyester) [43] und 1000 GPa (E-Modul-Wert von Diamant) [43] variiert. Der Wert für die Poisson-Zahl wurde dabei zunächst auf einen mittleren Wert von $\nu = 0,25$ festgesetzt. Das Ergebnis der Simulationen zeigt Abbildung 37. Die Auslenkung der Membran ist vom E-Modul abhängig. Die Veränderungen sind allerdings nicht so stark, wie bei nicht vorgespannten Membranen. Abbildung 37 zeigt eine Abhängigkeit der Auslenkung vom E-Modul mit $1/E$ mit einem hier nicht bestimmten Vorfaktor, da die genauen Abhängigkeiten nicht bekannt sind. Abbildung 38 zeigt die Abhängigkeit der Auslenkung vom E-Modul bei nicht vorgespannten Membranen. Für die Berechnung wurde der gleiche Radius, Höhe und wirkende Druck gewählt. Die Werte der Auslenkung wurden mithilfe von Gl. 19 bestimmt.

Die Werte der Auslenkung von vorgespannten Membranen variieren je nach E-Modul zwischen $w(r) = 3,12 \text{ nm}$ bei $E = 1 \text{ GPa}$ und $w(r) = 2,8 \text{ nm}$ bei $E = 1000 \text{ GPa}$, siehe Abbildung 37. Bei nicht vorgespannten Membranen variiert der Wert der Auslenkung zwischen $w(r) = 138 \text{ }\mu\text{m}$ bei $E = 1 \text{ GPa}$ und $w(r) = 0,138 \text{ }\mu\text{m}$ bei $E = 1000 \text{ GPa}$, siehe Abbildung 38.

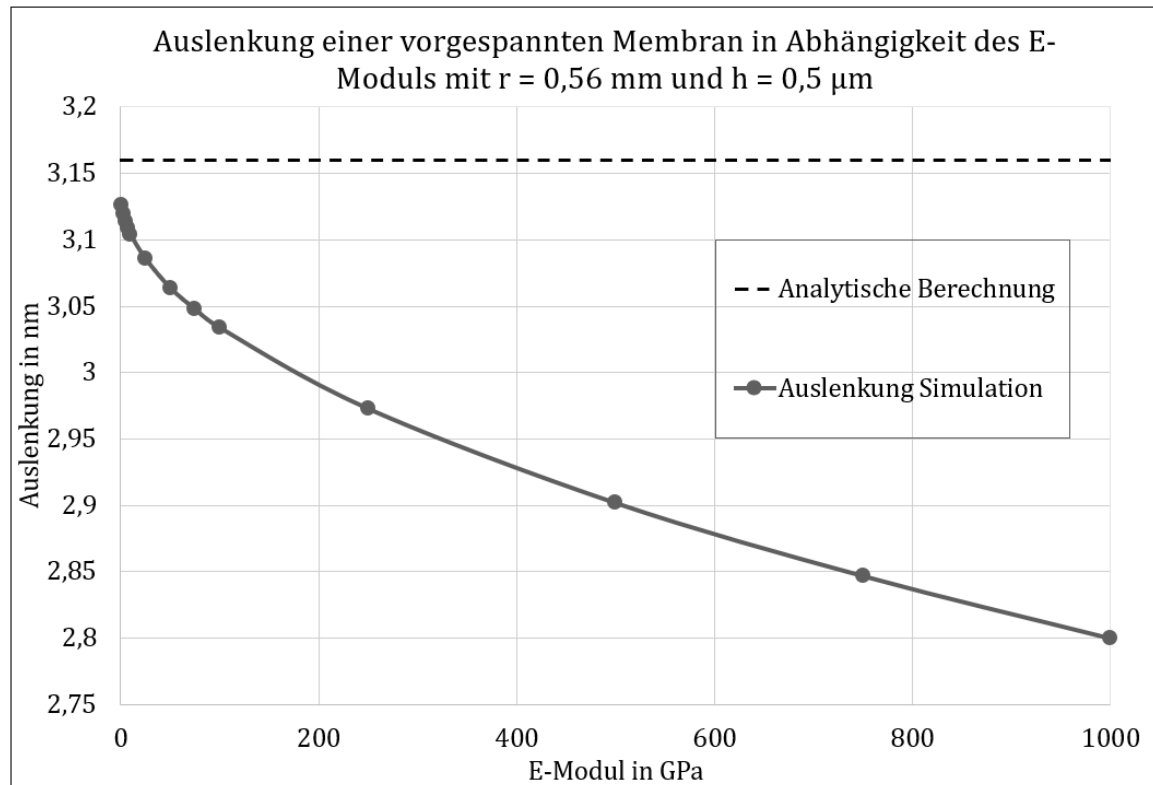


Abbildung 37: Maximale Auslenkung der vorgespannten Membran in Abhängigkeit vom E-Modul

Anders als bei der analytischen Berechnung nach [23] ist die Auslenkung abhängig vom E-Modul und damit abhängig vom gewählten Material. Allerdings ist die Abhängigkeit nicht so stark, wie bei nicht-vorgespannten Membranen.

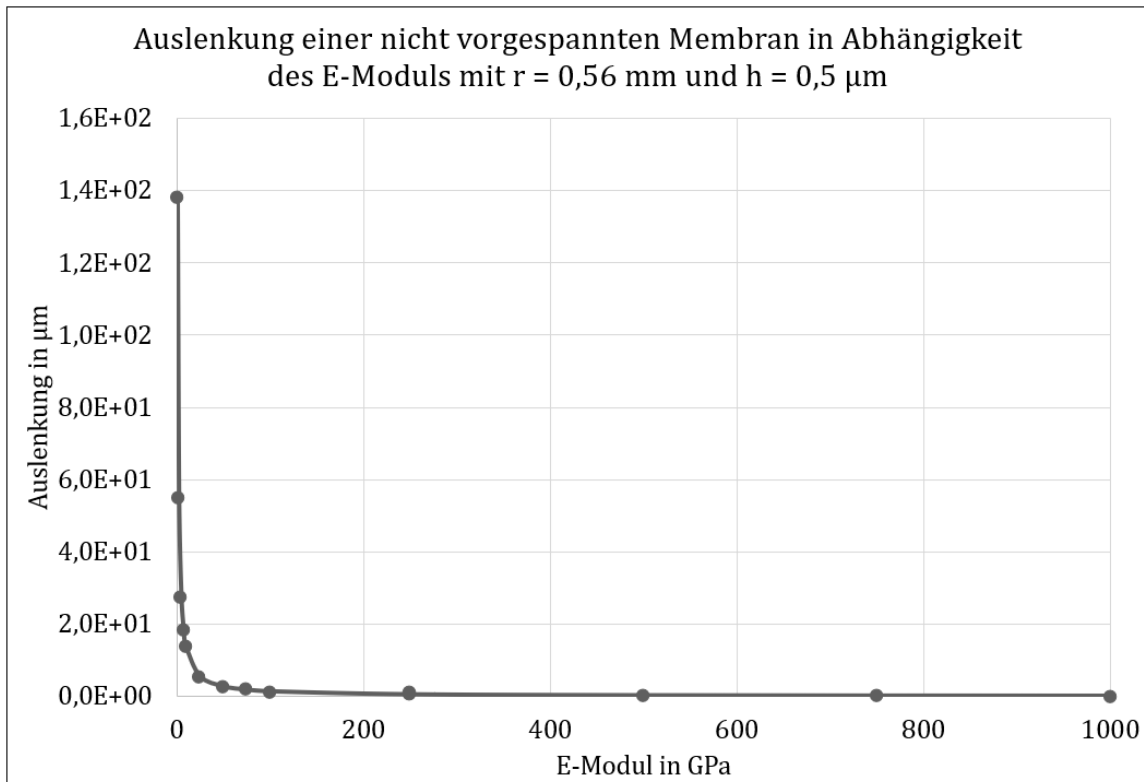


Abbildung 38: Maximale Auslenkung einer nicht vorgespannten Membran
Die Auslenkung wurde analytisch nach Gl. 19 bestimmt. Die Abhängigkeit vom E-Modul ist deutlich stärker als bei vorgespannten Membranen.

Die Abhängigkeit von der Poisson-Zahl wurde in dem Wertebereich der Poisson-Zahl von 0 bis 0,5 berechnet. Der E-Modul beträgt bei dieser Simulation 163 000 MPa, was dem Wert für den E-Modul einer Siliziummembran entspricht [44]. Als geometrisches Modell diente hier auch die Siliziummembran des MEMS-Mikrofon. In Abbildung 39 ist die Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der Poisson-Zahl dargestellt. In der Literatur wird zwar angegeben, dass die Poisson-Zahl einen Wert zwischen 0 und 0,5 liegt, allerdings liegt die Poisson-Zahl meist im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 [45]. Dies erklärt auch den Knick in Abbildung 39 im Bereich zwischen 0,25 und 0,4.

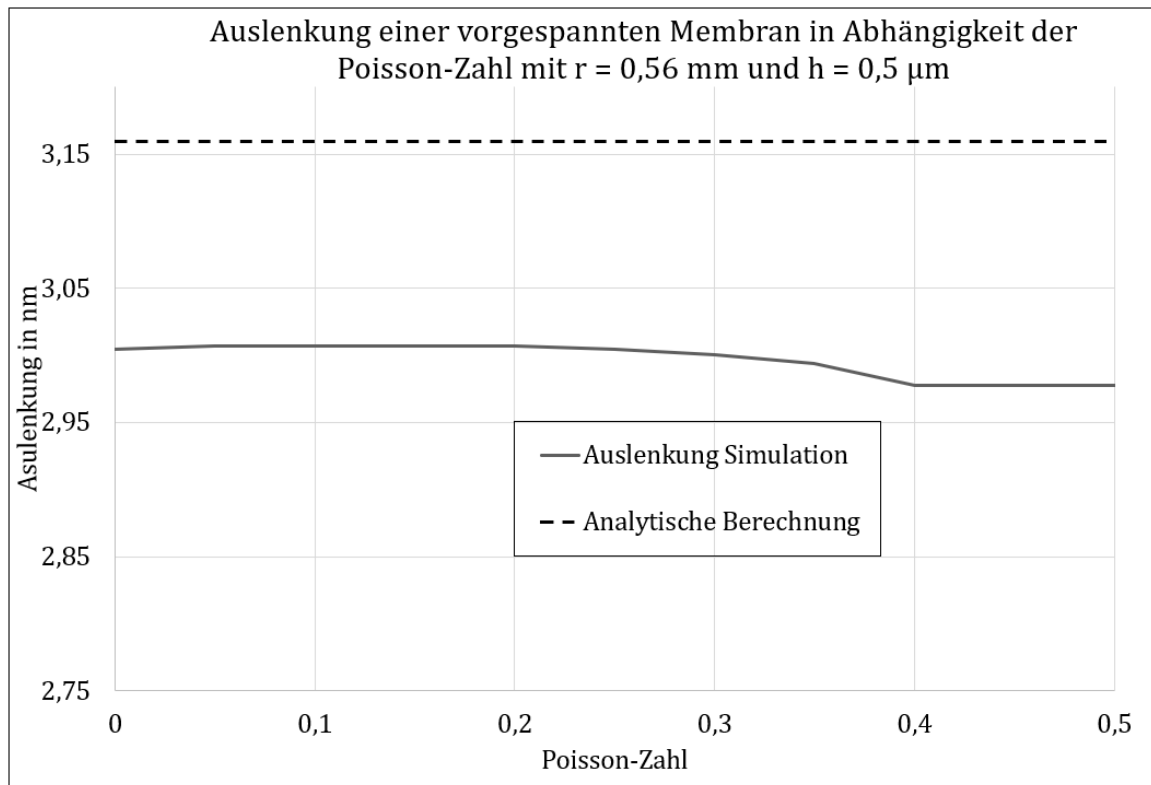


Abbildung 39: Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der Poisson-Zahl
Die Auslenkung ist vor allem im Bereich zwischen einer Poisson-Zahl von 0,25 bis 0,4 von der Poisson-Zahl abhängig. Allerdings ist diese Abhängigkeit recht gering.

Die Unterschiede zwischen der analytischen Lösung und der Simulation der Auslenkung in Abhängigkeit vom E-Modul und der Poisson-Zahl zeigt, dass die Auslenkung von der Biegesteifigkeit abhängig ist. Allerdings ist diese Abweichung im Vergleich zur Abhängigkeit der Auslenkung von der mechanischen Vorspannung noch relativ gering. Allgemein wirkt sich eine falsch gewählte Poisson-Zahl auf den Wert der Auslenkung nicht so stark aus, wie ein falsch gewähltes E-Modul.

Im nächsten Schritt wurde die Abhängigkeit der Auslenkung von der mechanischen Vorspannung simulativ berechnet, siehe Abbildung 40. Hier gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen der analytischen Berechnung und der Simulation zu erkennen. Die Auslenkung von vorgespannten Membranen nimmt verständlicherweise mit zunehmender Vorspannung ab. Bei höheren Vorspannungen stimmen die Werte der Auslenkung aus den Simulationen und analytischen Berechnungen immer besser überein.

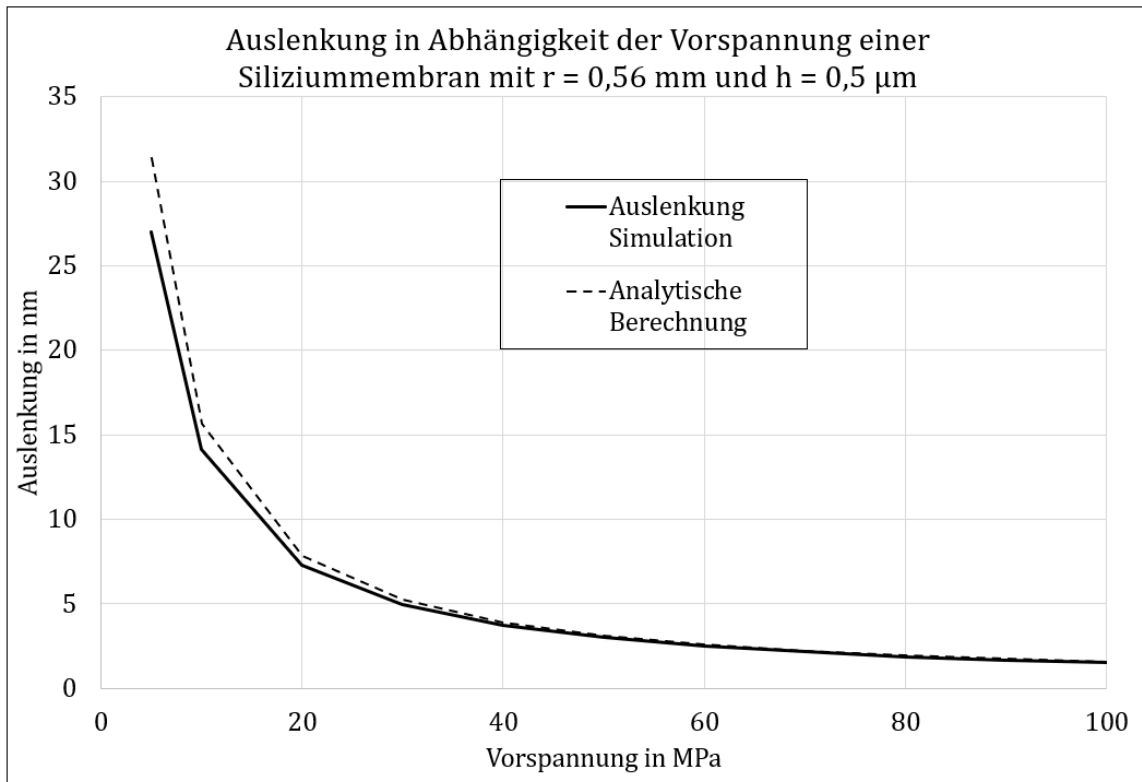


Abbildung 40: Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der mechanischen Vorspannung. Die Auslenkung von vorgespannten Membranen ist abhängig von der mechanischen Vorspannung der Membran. Außerdem ist die Übereinstimmung zwischen Simulation und analytischer Berechnung sehr gut und nimmt mit der Höhe der Vorspannung zu.

Um beurteilen zu können, ob die Simulationssoftware Code-Aster realistische Ergebnisse liefert, muss der Wert der Auslenkung mit einem sehr niedrigen Wert des E-Moduls bestimmt werden, da in Gl. 21 die Biegesteifigkeit nicht berücksichtigt wird. Durch den niedrig gewählten E-Modul spielt die Biegesteifigkeit in der Simulation auch eine untergeordnete Rolle. Daher kann das Ergebnis mit dem Wert aus Gl. 21 verglichen werden, um das Simulationsprogramm Code-Aster zu verifizieren. Für den Vergleich wurde der Wert des E-Moduls in der Simulation auf 1 GPa festgelegt. Simulativ berechnet ergibt sich so ein Wert für die Auslenkung von $w = 3,12$ nm. Nach Gl. 21 ergibt sich ein Wert der Auslenkung von $w = 3,16$ nm. Dies entspricht einer Abweichung zwischen analytischer Berechnung und Simulation von nur 1 %. Dies zeigt eindeutig, dass mithilfe der Simulationssoftware Code-Aster gute und glaubwürdige Ergebnisse berechnet werden können.

3.3. Simulation eines MEMS-Mikrofons

Da in dieser Arbeit hauptsächlich der Einfluss der Lotstellen nach einem Tempervorgang auf die Empfindlichkeit des Mikrofons untersucht werden soll, wird mit einem

vereinfachten Modell gerechnet. Bei diesem vereinfachten Modell werden das Trägersubstrat, die vier konvexen Lotstellen und der MEMS-Chip mit den beiden Gegenelektroden und der Membran betrachtet. Dies ist möglich, da die Polymerfolie dünn ist und ein E-Modul von nur etwa 10 MPa hat [46]. Die Metallkappe und der Kleber, der die Metallkappe mit der Trägerkeramik verbindet, werden nicht berücksichtigt. Eine schematische Darstellung des zu berechnenden vereinfachten Modells zeigt Abbildung 41.

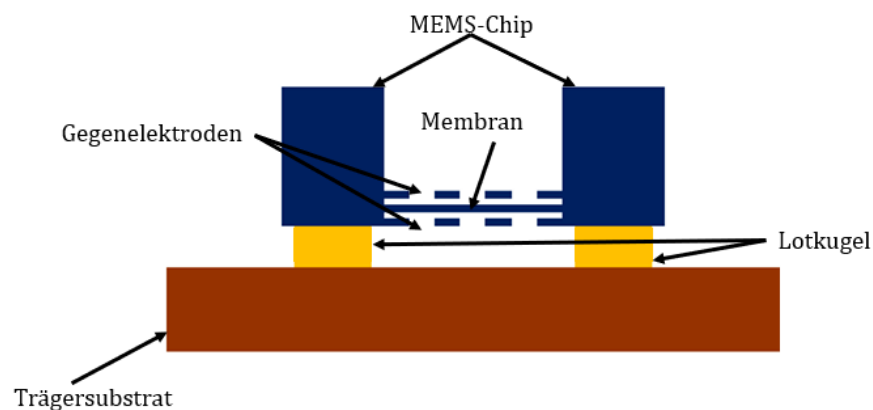


Abbildung 41: Schematische nicht maßstabgerechte Darstellung des vereinfachten Mikrofonmodells für die Simulation

Für die Simulation wird die weiche Polymerfolie und die Metallkappe nicht betrachtet, da vor allem die Einflüsse der Lotstellen bestimmt werden soll.

Mithilfe dieses vereinfachten Modells wird die Verformung der Siliziummembran simulativ berechnet. Anschließend wird nach Gl. 7 und Gl. 8 jeweils die Kapazität bestimmt. Um die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten vergleichen zu können, wird die Differenz der Kapazitäten bei einem wirkenden Druck von $p = + 1 \text{ Pa}$ und $p = - 1 \text{ Pa}$ bestimmt. Dieser Wert entspricht dem Effektivwert einer Schalldruckwelle, mit der das Mikrofon bei den Messungen beschallt wird. [47]

Im Folgenden wird die Simulation des Mikrofons exemplarisch für einen Druck von $p = + 1 \text{ Pa}$, der auf die Unterseite der Membran wirkt, vorgestellt. Die Simulation für $p = - 1 \text{ Pa}$ erfolgt auf die gleiche Weise.

Wahl des Einheitensystems

Auch hier werden die Simulationen mit dem Einheitensystem ‚mm-tonne-s‘ durchgeführt.

Erstellen der Geometrie

Die Geometrie wird, wie in 2.7.2 beschrieben, erstellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 42 zu sehen. Die Kreisringe wurden bei der Membran eingefügt, um eine gleichmäßige Vernetzung garantieren zu können.

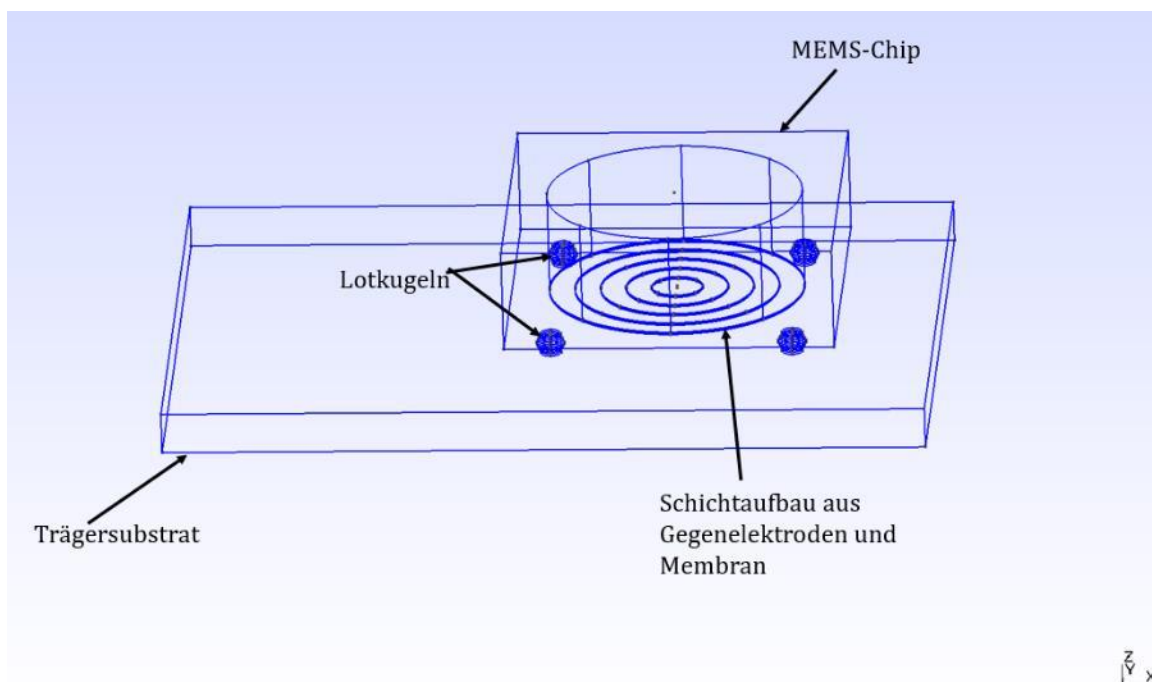


Abbildung 42: Geometrisches Modell des Mikrofons

Das geometrische Modell besteht aus der Trägerkeramik (HTCC), den konvexen Lotstellen, dem MEMS-Chip und dem Schichtaufbau aus den Gegenelektroden mit der Siliziummembran in der Mitte.

Vernetzung

Die Vernetzung wurde automatisch mit dem Programm GMSH berechnet. Das Ergebnis der Vernetzung zeigt Abbildung 43 a. In Abbildung 43 b ist die Vernetzung für eine Lotstelle dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass das Trägersubstrat im Vergleich zu den restlichen Strukturen gröber vernetzt worden ist. Für alle vier Lotstellen wurde normalerweise eine konvexe Form gewählt. Bei einzelnen Simulationen wurden davon abweichende Formen simuliert. Darauf wird im Einzelfall hingewiesen.

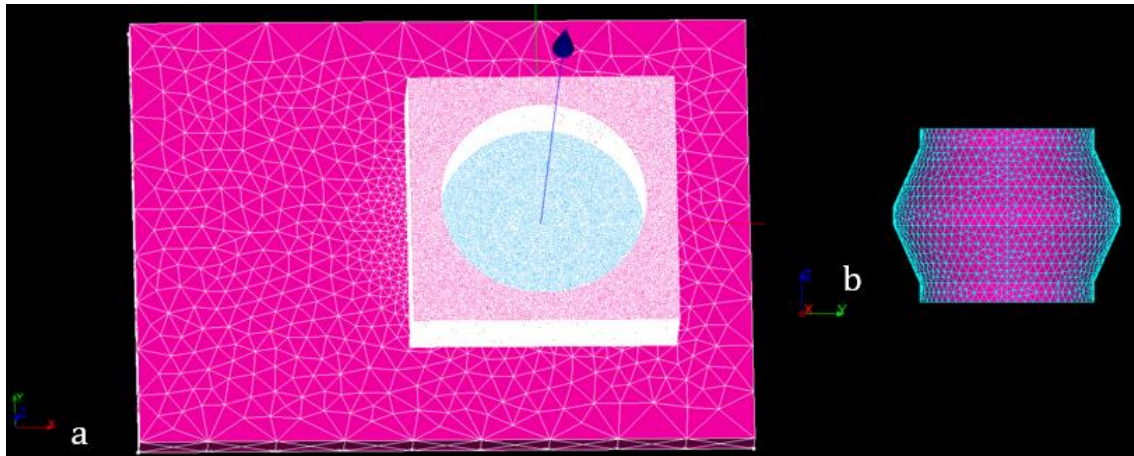


Abbildung 43: Vernetzte Geometriestruktur des Mikrofons

Das Trägersubstrat wurde gröber vernetzt als der MEMS-Chip, die Membran, die Gegenelektroden und die Lotstellen. Die Lotstellen haben eine konvexe Form. Alle vier Lotstellen haben die Form, wie es rechts dargestellt ist. Auf Ausnahmen wird extra hingewiesen.

Strukturierte Vernetzung (Hexaedervernetzung)

In 2.7.3 wurde der Unterschied zwischen einer strukturierten (\triangleq Hexaeder) und einer unstrukturierten (\triangleq Tetraeder) Vernetzung beschrieben. Da die strukturierte Vernetzung auch eine Möglichkeit ist eine Vernetzung durchzuführen, wurde diese auch auf die Mikrofon-Struktur angewendet. Dies ist in Abbildung 44 a dargestellt. Abbildung 44 b zeigt die Unterseite des MEMS-Chips.

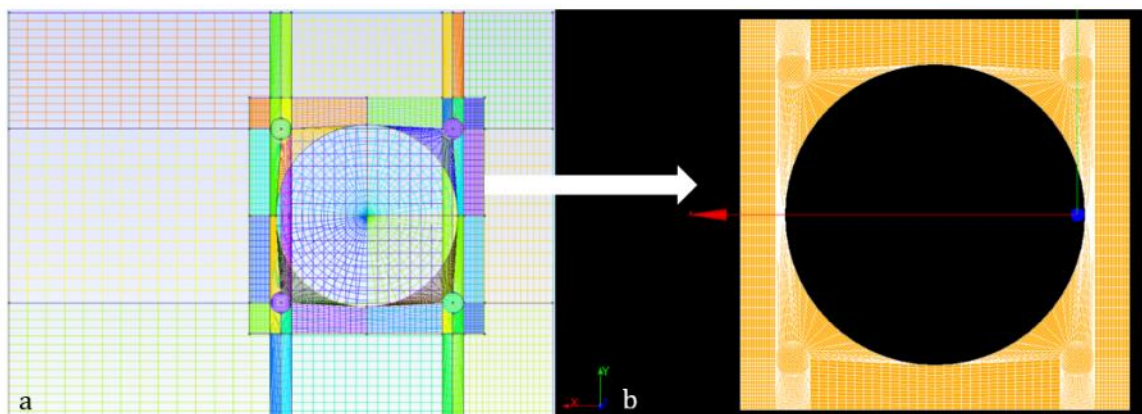


Abbildung 44: Darstellung der strukturierten Vernetzung des Mikrofons

Der Versuch eine strukturierte Vernetzung auf die Mikrofon-Geometrie anzuwenden, funktioniert nicht, da sich dadurch Verzerrungen ergeben.

Es ist zu erkennen, dass die Geometrie in viele Teile unterteilt werden musste, um eine strukturierte Vernetzung anwenden zu können. Diese Unterteilung ist jedoch sehr zeitaufwendig. Außerdem sind die Linien verzerrt worden, siehe Abbildung 44 b. Dies führte allerdings in der weiteren Durchführung der Simulationen zu Problemen

bei der Berechnung dieses Systems. Deshalb wurde auf eine weitere Betrachtung der Hexaedervernetzung verzichtet.

Aufsetzen der Berechnung

Für die Simulation soll ein Druck von $p = + 1 \text{ Pa}$ auf die Unterseite der Membran wirken. Zunächst müssen die Materialparameter definiert werden. Die für diese Simulation verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Materialparameter für Simulation [48]

Komponente	E-Modul in MPa	Poisson-Zahl	α in $1/\text{K}$
Trägersubstrat	310000	0,25	$7,6 * 10^{-6}$
Lot	44113 bei 20°C	0,36	$2,2 * 10^{-5}$
Silizium MEMS-Chip	163000	0,224	$3,2 * 10^{-6}$
Silizium Gegenelektroden	163000	0,224	$3,2 * 10^{-6}$
Silizium Membran	163000	0,224	$3,2 * 10^{-6}$

Des Weiteren wird die Membran mit $\sigma_{\text{vor}} = 50 \text{ MPa}$ vorgespannt. Anschließend wird der Druck auf die entsprechende Fläche (= Unterseite der Membran) definiert. Nach der Wahl der Darstellung der Ausgabewerte, kann die Berechnung durchgeführt werden.

Darstellen des Ergebnisses

In Abbildung 45 ist das Ergebnis der Simulation dargestellt. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 46 eine nicht maßstabsgetreue Darstellung des Ergebnisses. Hier wurden die Gegenelektroden weggelassen und die Auslenkung der Membran so überhöht dargestellt, dass die Verformung gut erkennbar ist.

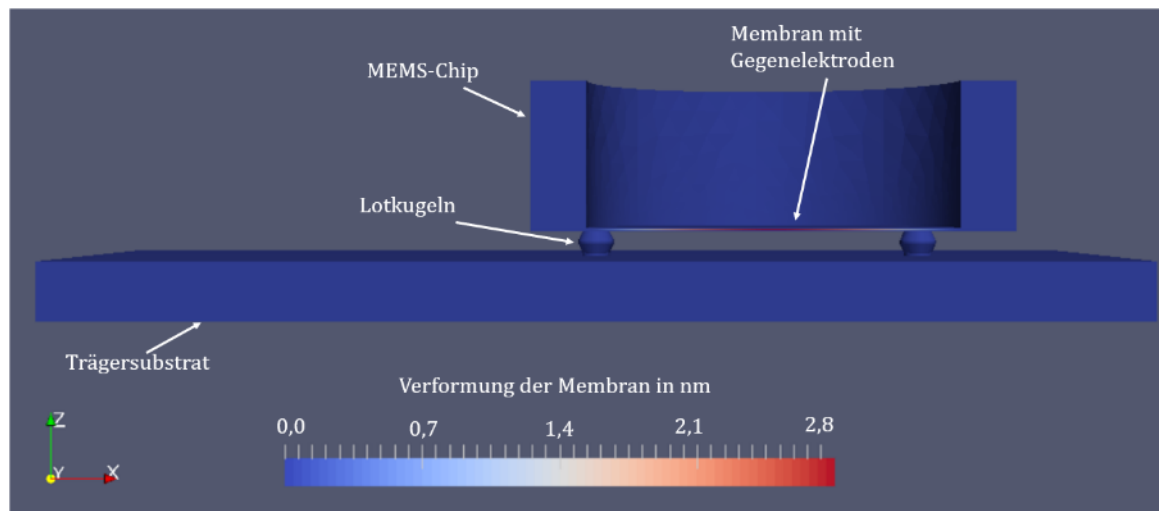


Abbildung 45: Ergebnis der Simulation im Schnittmodell
Es verformt sich nur die Membran. Auf diese wirkt ein Druck von $p = 1 \text{ Pa}$.

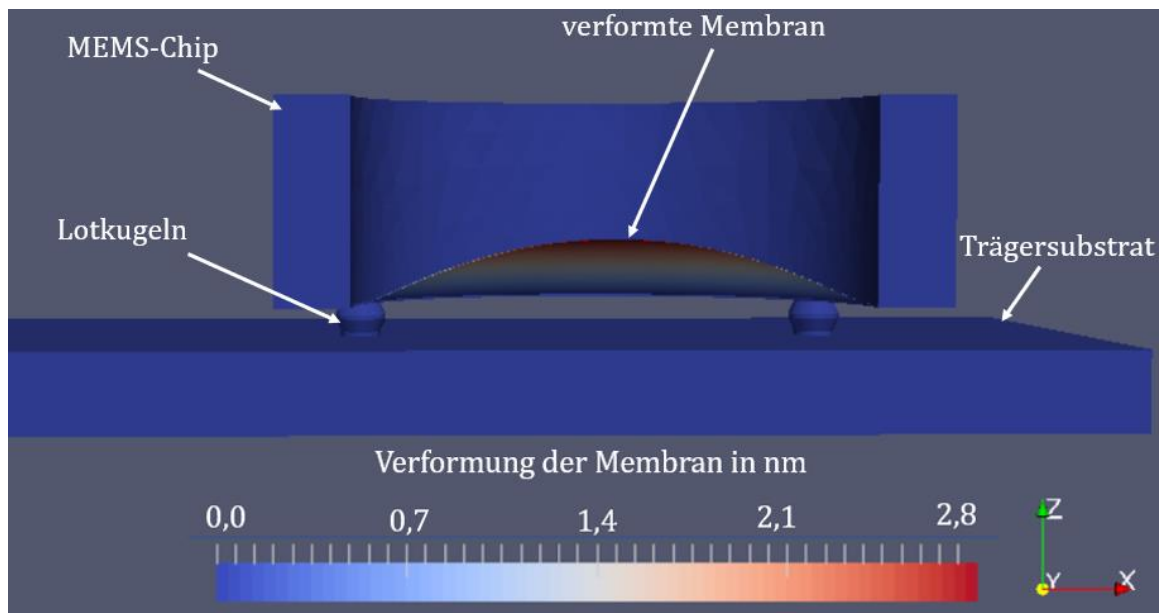


Abbildung 46: Nicht maßstabsgetreue Darstellung der verformten Membran
Das Trägersubstrat ist abgeschnitten und die verformte Membran ist nicht maßstabsgetreu dargestellt. Die Gegenelektroden wurden für diese Darstellung weggelassen.

Für diese Simulation wurde eine Feinheit des Netzes gewählt, die bei einer zufriedenstellenden Berechnungsdauer ein realistisches Ergebnis liefert. Die Berechnungsdauer beträgt 4091 s. Dabei wurde eine Membranauslenkung von 2,8 nm berechnet.

Verifizierung des Ergebnisses

Nach der analytischen Berechnung (Gl. 20) hat sich für den Wert der Auslenkung der Membran $w(r) = 3,16$ nm ergeben. Die Abweichung beträgt zum analytisch berechneten Wert 11,2 %. Wie in 3.2. beschrieben wird, im Gegensatz zur analytischen Berechnung, bei der Simulation die Biegesteifigkeit nicht vernachlässigt. Mit Berücksichtigung der Biegesteifigkeit ergibt sich für die Auslenkung ein konvergierender Wert von 2,9 nm (siehe Abbildung 47). Damit ergibt sich eine Abweichung von 2,75 %. Außerdem wurde bei der oben beschriebenen Simulation die Berechnungsdauer so im Rahmen gehalten, dass für weitere zeitlich längere Simulationen die Berechnungsdauer nicht zu lange ist. Für diese Simulation wurde noch eine Netzkonvergenzstudie durchgeführt. Hierfür wurde vor allem die Anzahl der Tetraeder für die Vernetzung der Membran erhöht. Das Ergebnis der Netzkonvergenzstudie ist in Abbildung 47 dargestellt. Die weiteren Simulationen wurden mit einer Anzahl an Tetraedern von $3,2 \cdot 10^6$ Tetraedern durchgeführt.

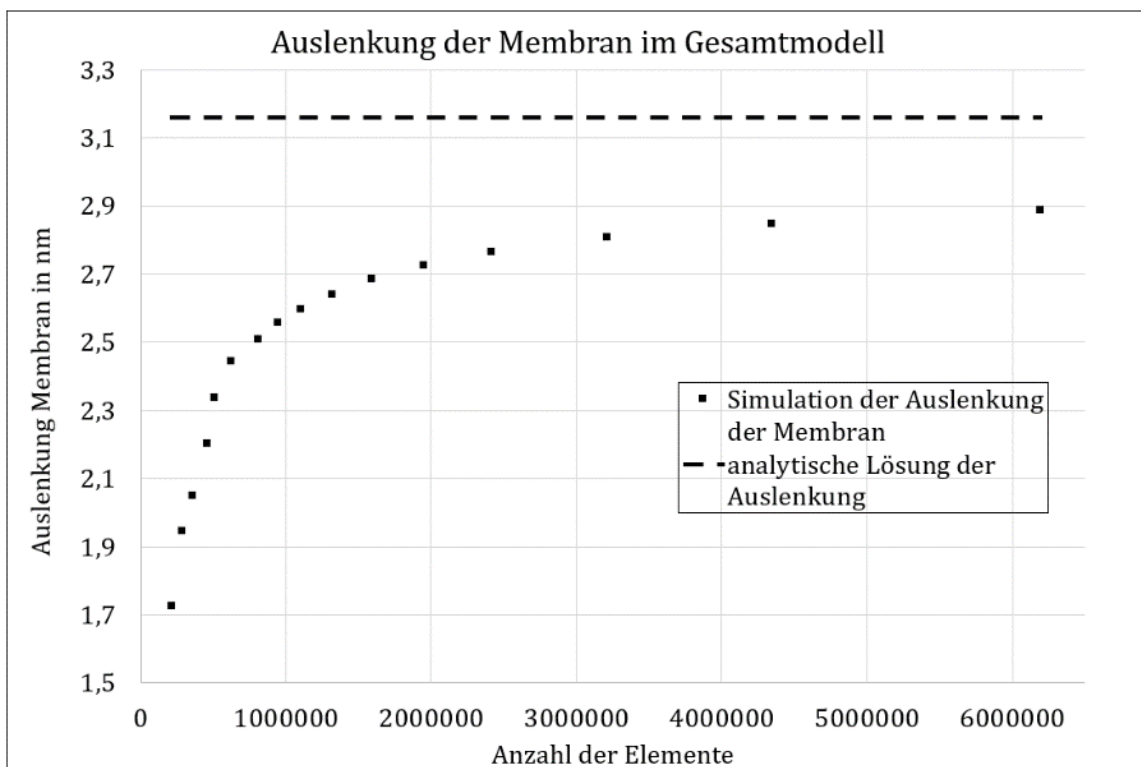


Abbildung 47: Netzkonvergenzstudie für die Auslenkung der Membran im Gesamtmodell
Mit der Zunahme der Tetraeder bei der Vernetzung der Mikrofonometrie nimmt der Wert der Auslenkung zu und konvergiert zu einem Wert.

3.4. Kriechverhalten für die Simulation

Für die Berechnung der Temperaturhysterese des Mikrofans spielt das Kriechverhalten der Lotstellen eine zentrale Rolle. In dieser Arbeit wurde die Lotzusammensetzung SnAg_{3,8}Cu_{0,7} (SAC 387) untersucht. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Kriechrate vorgestellt. Zunächst wurde versucht die Kriechrate über eine Mittelung von bereits veröffentlichten Kriechraten zu bestimmen. Anschließend konnten eigene Messungen mit einem Nanoindenter direkt an den Lotstellen durchgeführt werden, um daraus einen eigenen Wert für die Kriechrate zu bestimmen.

3.4.1. Kriechrate aus Mittelung veröffentlichter Kriechraten

Die Simulationen werden mit dem Kriechmodell nach Garofalo durchgeführt, siehe 2.5. Zur Vereinfachung wird Gl. 23 hier wiederholt [31].

$$\dot{\epsilon} = C_1 * (\sinh(C_2 * \sigma))^{C_3} * \exp\left(\frac{-C_4}{R * T}\right) \quad \text{Gl. 23}$$

Kriechraten werden üblicherweise in Abhängigkeit von der anliegenden mechanischen Spannung untersucht. Der Verlauf lässt sich dann nach dem Garofalo-Modell mithilfe von mathematischen Fits bestimmen, indem die vier Koeffizienten $C_1 - C_4$ entsprechend angepasst werden können.

Aus der Literatur sind einige weitere Messungen zu Kriechraten für das Lot SAC 387 nach dem Garofalo-Modell bekannt [49]. In Tabelle 3 sind für vier Kriechraten die Koeffizienten für das Garofalo-Modell aufgelistet, die in weiterer Literatur sehr oft verwendet werden. [50]

Tabelle 3: Koeffizienten für Garofalo-Modell aus Veröffentlichungen [29], [51] – [53]

	C_1 in 1/s	C_2 in 1/MPa	C_3	C_4 in J/mol
[51]	277984	0,02447	6,41	54445
[29]	3200	0,037	5,1	54249,2
[52]	501,3	0,0316	4,96	45176,8
[53]	143,3	0,108	3,7884	62915

Abbildung 48 zeigt den Verlauf der Kriechraten, die mit den in der Tabelle 3 angegebenen Koeffizienten aus der Literatur nach dem Garofalo-Modell berechnet wurden. Für die vorliegende Arbeit ist der Spannungsbereich von 40 bis 100 MPa relevant.

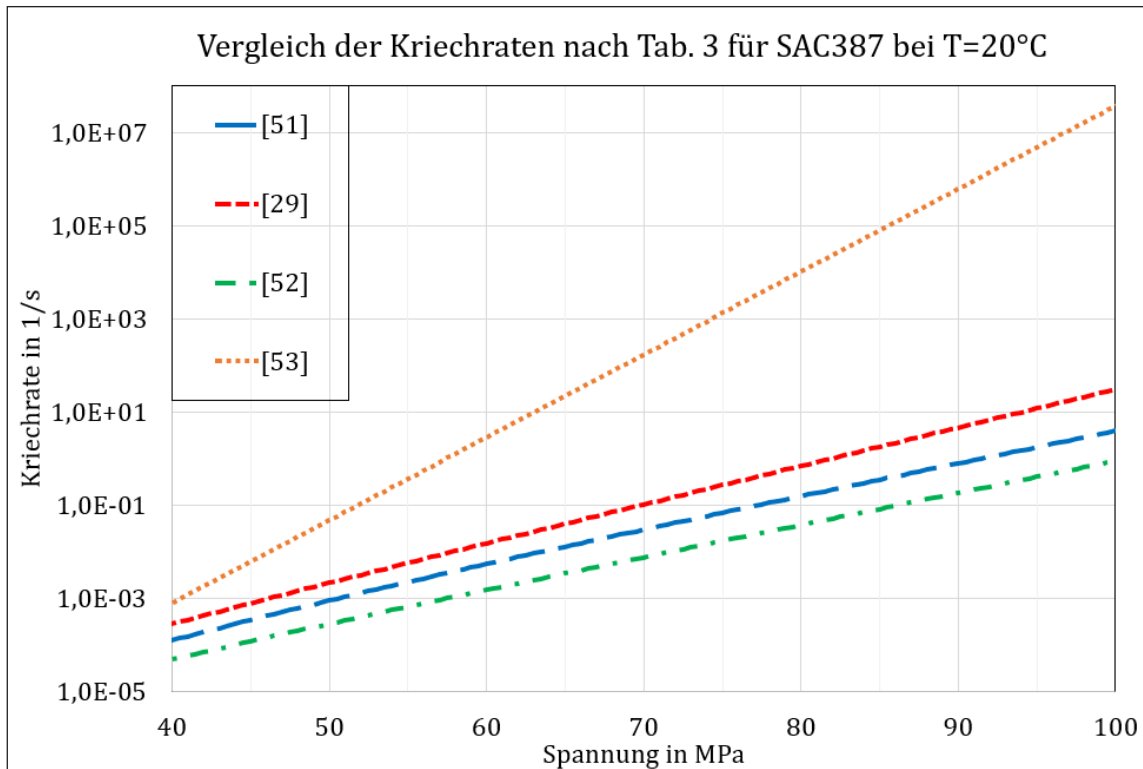


Abbildung 48: Vergleich der Kriechraten aus Veröffentlichungen, siehe Tabelle 3 [29], [51] – [53]

Die unterschiedlichen Kriechraten unterscheiden sich aufgrund ihrer Koeffizienten. Diese Kriechraten sind experimentell von verschiedenen Autoren für die gleiche Lotlegierung bestimmt worden.

Tabelle 3 und Abbildung 48 zeigen eindeutig, dass das Verhalten der Kriechrate bei Belastung mit einer mechanischen Spannung für dieselbe Lotlegierung von verschiedenen Autoren ganz unterschiedlich beobachtet wurde. Um nicht willkürlich eine Kriechrate als die ‚ultimative Kriechrate‘ zu definieren, wurde zunächst versucht, rechnerisch eine mittlere Kriechrate zu finden.

Im ersten Ansatz werden die Koeffizienten C_1 bis C_4 arithmetisch gemittelt, siehe Gl. 24 Mit den so ermittelten Koeffizienten wurde der Verlauf nach Garofalo berechnet. Das Ergebnis dieser Mittelung ist in Abbildung 49 zusammen mit den Literaturdaten (wie schon in Abbildung 48) dargestellt.

$$\dot{\epsilon} = 77657 \frac{1}{s} * \left(\sinh\left(0,05 \frac{1}{\text{MPa}} * \sigma\right) \right)^{5,06} * \exp\left(\frac{-54196,5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{R * T}\right) \quad \text{Gl. 24}$$

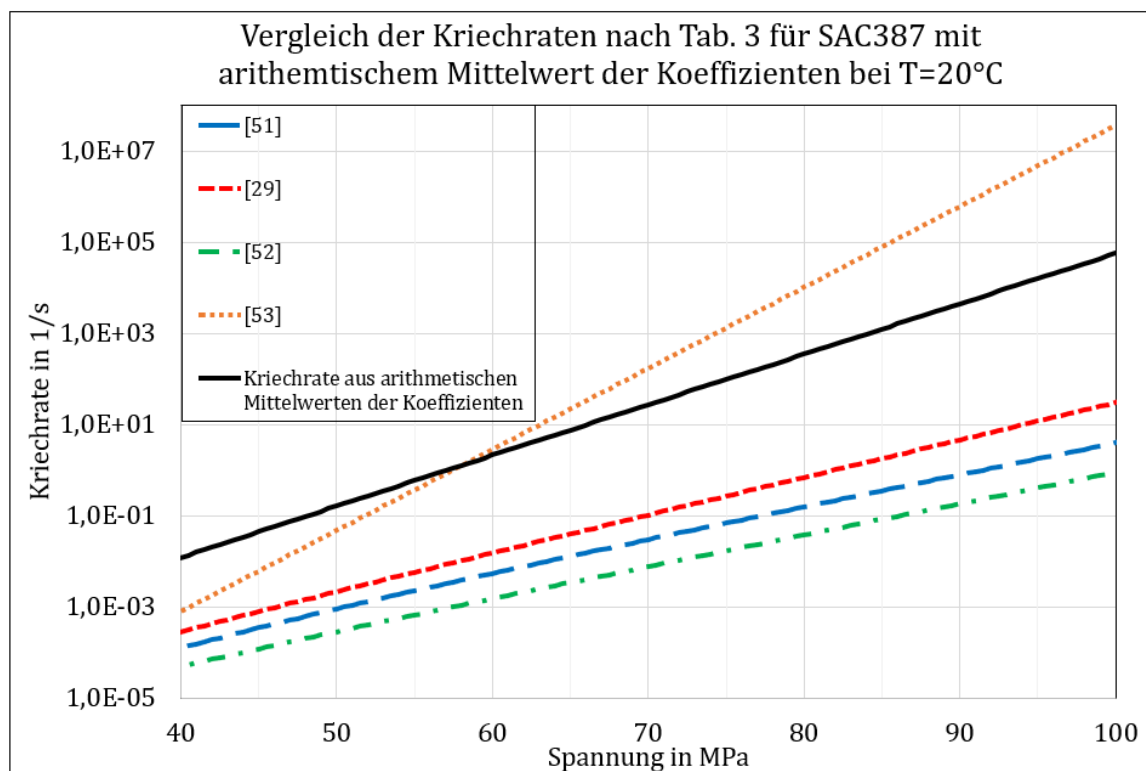


Abbildung 49: Darstellung der arithmetisch gemittelten Kriechrate mit den Kriechraten aus Tabelle 3 [29], [51] – [53]

Die Kriechrate mit den arithmetisch gemittelten Koeffizienten (schwarz) liegt über den anderen Kriechraten.

In Abbildung 49 ist deutlich zu erkennen, dass das arithmetische Mittel für alle Koeffizienten nicht die geeignete Wahl ist. Die so gemittelte Kriechrate liegt über den aus [29], [51] – [53] bekannten Kriechraten.

Bei dem Vergleich der Koeffizienten aus [29], [51] – [53] fällt auf, dass die einzelnen C_1 -Koeffizienten stark voneinander abweichen. Daher eignet sich eine arithmetische

Mittelung, siehe Abbildung 49, nicht für die Mittelung des C_1 -Koeffizienten. Beim arithmetischen Mittelwert hat ein hoher Wert eine größere Gewichtung für den bestimmten Mittelwert. Daher muss für die Mittelung des C_1 -Koeffizienten eine andere Mittelung durchgeführt werden. In dieser Arbeit wurde für die Mittelung des C_1 -Koeffizienten der geometrische Mittelwert verwendet. Der geometrische Mittelwert berechnet sich allgemein nach Gl. 25. Der geometrische Mittelwert hat hier den Vorteil, dass die höhere Zahl einen geringeren Einfluss auf den berechneten Mittelwert hat als bei der arithmetischen Mittelung. [54]

$$\overline{x_{\text{geo}}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 * x_2 * \dots * x_n} \quad \text{Gl. 25}$$

Für das arithmetische Mittel des C_1 -Koeffizienten ergibt sich ein Wert von $\overline{C_{1\text{arith}}} = 77657 \frac{1}{\text{s}}$ und für den geometrischen Mittelwert ergibt sich ein Wert von $\overline{C_{1\text{geo}}} = 5028 \frac{1}{\text{s}}$.

Nach dieser Mittelung ergibt sich die folgende Kriechrate, siehe Gl. 26. Diese wird nachfolgend als Kriechrate Mittelung bezeichnet.

$$\dot{\varepsilon} = 5028 \frac{1}{\text{s}} * \left(\sinh\left(0,05 \frac{1}{\text{MPa}} * \sigma\right) \right)^{5,06} * \exp\left(\frac{-54196,5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{R * T}\right) \quad \text{Gl. 26}$$

In Abbildung 50 ist der Vergleich zwischen der Kriechrate Mittelung und den aus Tabelle 3 aufgeführten Kriechraten dargestellt. Die Kriechrate Mittelung liegt zwar auch noch leicht über den anderen Kriechraten, allerdings nicht so stark, wie die Kriechrate mit den arithmetisch gemittelten Koeffizienten. Dargestellt ist der relevante Spannungsbereich von 40 bis 100 MPa.

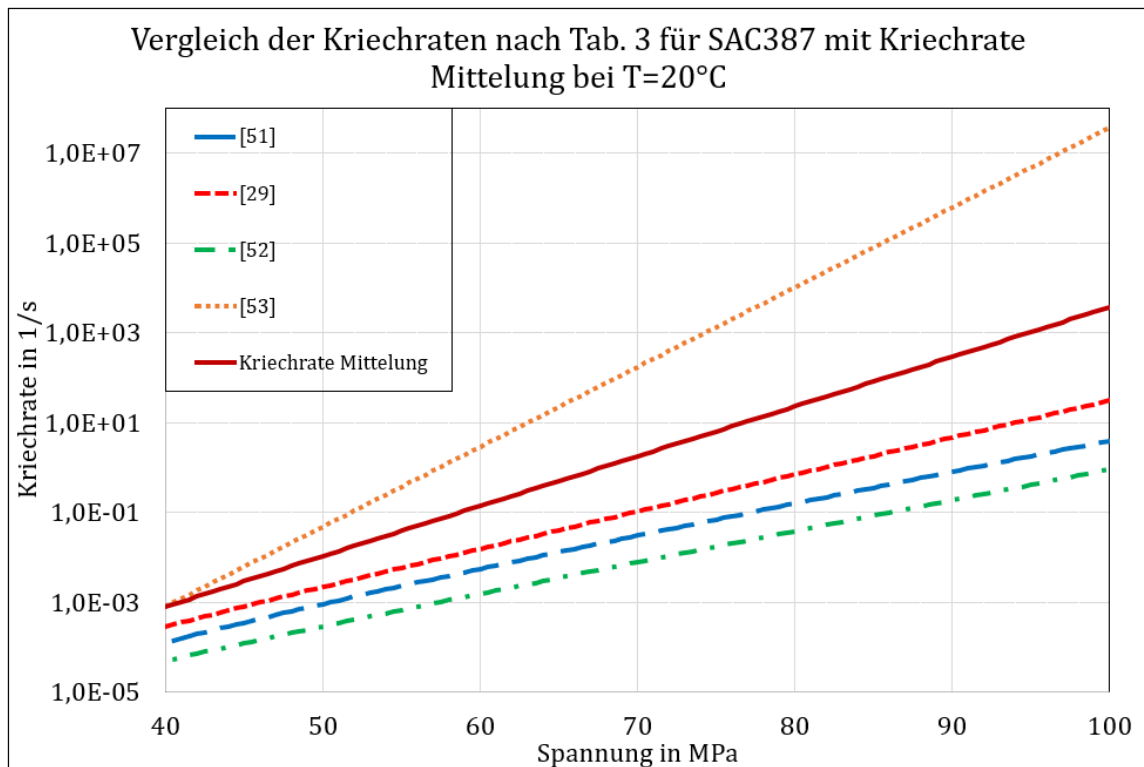


Abbildung 50: Kriechraten aus Tabelle 3 mit Kriechrate Mittelung [29], [51] – [53]
Die Kriechrate Mittelung (rot) liegt noch leicht über drei der Kriechraten aus [29], [51] – [53]
Sie eignet sich etwas besser für die Simulation als die Kriechrate mit den arithmetisch gemittelten Koeffizienten.

Mit den so ermittelten Koeffizienten für die Kriechrate Mittelung wurden nun erste Simulationen durchgeführt, die die Veränderungen der Empfindlichkeit des Mikrofons nach einer Temperung beschreiben. In Abbildung 51 ist zu erkennen, dass sich die über die Simulation ermittelte Temperaturhysterese und die experimentell bestimmte Temperaturhysterese noch stark unterscheiden. Deshalb wurden im Rahmen einer Masterarbeit innerhalb dieses Projektes mit einem Nanoindenter Messungen direkt an den Lotstellen durchgeführt, aus denen man die Kriechrate bestimmen kann.

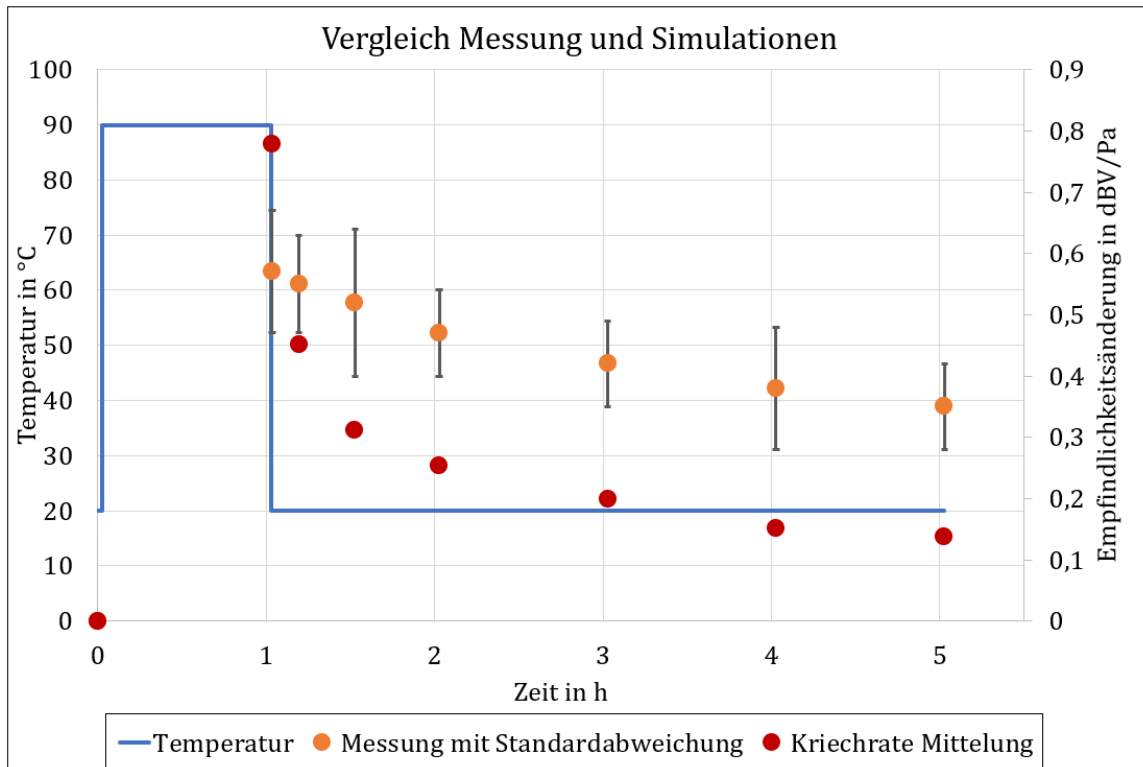


Abbildung 51: Zeitlicher Verlauf der Mikrofonempfindlichkeit nach einer Temperung und Vergleich von Messungen und Simulationen mit der Kriechrate Mittelung

Die beiden Temperaturhysteresen unterscheiden sich noch stark. Es liegt nahe, dass die Kriechrate Mittelung das Verhalten der Mikrofone nicht gut abbildet.

3.4.2. Bestimmung der Kriechrate mit einem Nanoindenter

Da die Kriechrate der Lotstellen eine zentrale Rolle bei der Simulation spielt, wurde die Kriechrate mithilfe eines Nanoindenters gemessen. Für die Messungen fanden bei Raumtemperatur mit dem Picodenter HM500 der Firma Fischer GmbH statt [55].

Bei der Nanoindentermessung wird eine Kristallspitze mit bekannter Geometrie und einer definierten Kraft in die Probe gedrückt. Dabei wird die Eindringtiefe kontinuierlich gemessen. Die Messung wird mithilfe einer Wirbelstromsonde durchgeführt und hat bei dem verwendeten Nanoindenter eine maximale Abweichung der Auflösung von 40 pm. Die Kraft wird durch eine Software eingestellt und wird mithilfe einer Magnetspule erzeugt. Die Kraftauflösung des verwendeten Nanoindenters hat eine maximale Abweichung von 100 nN. Für die Messung der Kriechrate wurde für die Kraft ein Wert von 30 mN gewählt, da bei einer zu hohen Kraft der Nanoindenter die komplette Lotkugel durchdringt und die Kriechrate nicht bestimmt werden kann.

Die Kraft muss allerdings groß genug sein, damit Umgebungseinflüsse, wie z. B. Erschütterungen, vernachlässigt werden können. Außerdem soll die Kriechrate des Gefüges und nicht die Kriechrate einzelner Körner bestimmt werden. [56]

Messung direkt an den Lotstellen

Die Bestimmung der Kriechrate mithilfe des Nanoindenters wurde direkt an den Lotstellen durchgeführt. Dafür wurden die Mikrofone in Epoxidharz eingebettet. Anschließend wurde dieses Epoxidharz und die anderen Teile des Mikrofons abgeschliffen, bis die Lotstellen frei gelegt waren.

Dann kann die Messung gestartet werden:

Die Kristallspitze und die Lotstelle müssen sich direkt übereinander befinden. Der Nanoindenter kann nun an die Probe herangefahren werden bis sich die Probe und der Nanoindenter berühren. Anschließend wird die Kraft innerhalb von 30 s auf 30 mN erhöht. Danach wird die Kraft für 60 s gehalten. Während dieser Zeit kann das Kriechverhalten bestimmt werden. Im letzten Schritt wird die Kraft innerhalb von 30 s wieder auf 0 N reduziert und die Kristallspitze wird von der Probenoberfläche entfernt. Für die Kriechrate muss die Spannung unterhalb der Nanoindenterspitze bestimmt werden.

Bestimmung der Spannung

Die Spannung unterhalb der Kristallspitze berechnet sich nach Gl. 27 [57].

$$\sigma = \frac{F}{A_p} \quad \text{Gl. 27}$$

Dabei steht σ für die Spannung unter der Kristallspitze, F für die Kraft, die auf die Spitze ausgeübt wird, und A_p für die projizierte Fläche unter dem Nanoindenter. Nach [58] ist für die plastische Verformung nur ein Drittel der Spannung verantwortlich. Daher wurde in [49] die Spannung mit Gl. 28 bestimmt.

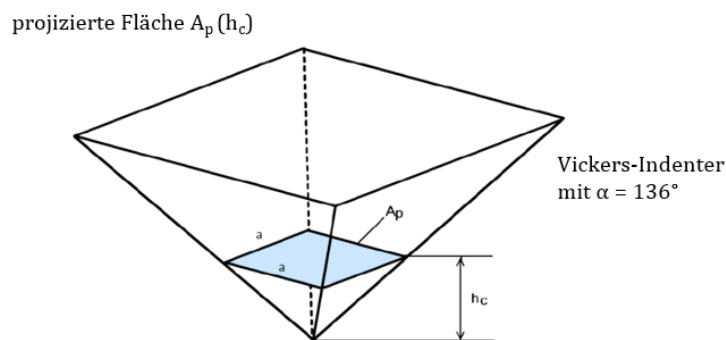
$$\sigma_{\text{Kriech}} = \frac{1}{3} \frac{F}{A_p} \quad \text{Gl. 28}$$

Die projizierte Fläche ist abhängig von der Eindringtiefe des Nanoindenters, siehe Abbildung 52. Sie zeigt den Messvorgang einer Nanoindentermessung. Die Kristallspitze befindet sich zunächst über der Probenoberfläche (Abbildung 52 a). Im nächsten Schritt ist die Spitze minimal in die Probe eingetaucht (Abbildung 52 b). Nach dem die volle Kraft ausgeübt wird, ist die Eindringtiefe erreicht (Abbildung 52 c).



Abbildung 52: Darstellung des Messablaufs bei einer Nanoindentermessung
Zunächst ist die Messspitze über der Probe. Dann ist die Nanoindenterspitze minimal in die Probe eingetaucht und im letzten Schritt wurde die volle Kraft ausgeübt und die Eindringtiefe ist erreicht.

Der hier verwendete Nanoindenter hat als Spitze einen Vickers-Indenter. Dieser ist eine vierseitige Pyramide und mit einem Öffnungswinkel von $\alpha = 136^\circ$. Ein Vickers-Indenter mit der projizierten Fläche ist in Abbildung 53 dargestellt [49] [56].



$$A_p = \text{projizierte Fläche des Eindringkörpers auf Höhe der Kontaktfläche } h_c$$

Abbildung 53: Darstellung eines Vickers-Indenter mit projizierter Fläche und Eindringtiefe
Die projizierte Fläche ist wichtig für die Bestimmung der Spannung unter dem Nanoindenter.

Die projizierte Fläche kann in Abhängigkeit der Eindringtiefe h_c und mithilfe des Öffnungswinkels berechnet werden. Um die Kantenlänge a der projizierten Fläche A_p zu bestimmen, kann das in Abbildung 54 dargestellte Dreieck und Gl. 29 verwendet werden [59].

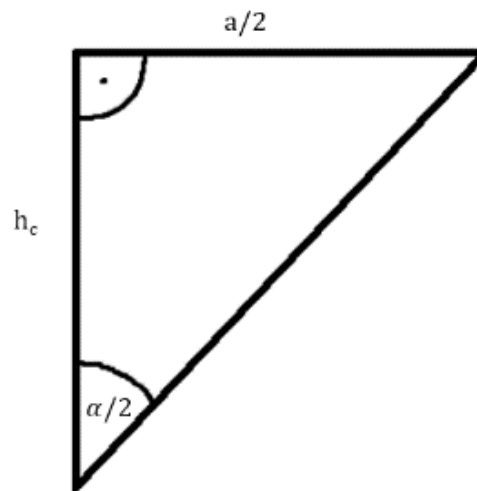


Abbildung 54: Dreieck für die Berechnung der Kantenlänge a [49]
Mithilfe des Dreiecks ist es möglich die Kantenlänge zu bestimmen. Die projizierte Fläche ist abhängig von der Kantenlänge.

$$2 * \frac{a}{2} = 2 * \left(h_c * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) = 2h_c * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \text{Gl. 29}$$

Für die projizierte Fläche ergibt sich daher, siehe Gl. 30.

$$A_p = a^2 = \left(2h_c * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right)^2 = 24,504 * h_c^2 \quad \text{Gl. 30}$$

Damit die Messergebnisse des Nanoindenters als Kriechrate bestimmt werden und mit den vorher beschriebenen Kriechraten (siehe Abbildung 50 und Tabelle 3) verglichen werden können, müssen die Messergebnisse umgerechnet werden. Dies wird nachfolgend ausführlicher beschrieben.

Bestimmung der Kriechrate aus Nanoindentermessung

Die Messkurve aus der Nanoindentermessung kann in drei Teile unterteilt werden: Krafterhöhung, Konstanthaltung der Kraft und Kraftreduzierung. Dies zeigt Abbildung 55. Bei der Krafterhöhung wird die Kraft auf die Nanoindenterspitze bis zur gewünschten Kraft erhöht. Die Eindringtiefe ändert sich relativ zur Krafterhöhung. Bei der Konstanthaltung der Kraft ändert sich die Eindringtiefe, falls es sich um ein kriechendes Material handelt. Mithilfe dieses Bereichs kann dann das Kriechverhalten des Materials mithilfe von weiteren Umrechnungen bestimmt werden. Anschließend wird die Kraft reduziert, bis keine Kraft mehr auf die Probe wirkt. Die Eindringtiefe verändert sich nun nicht mehr [57].

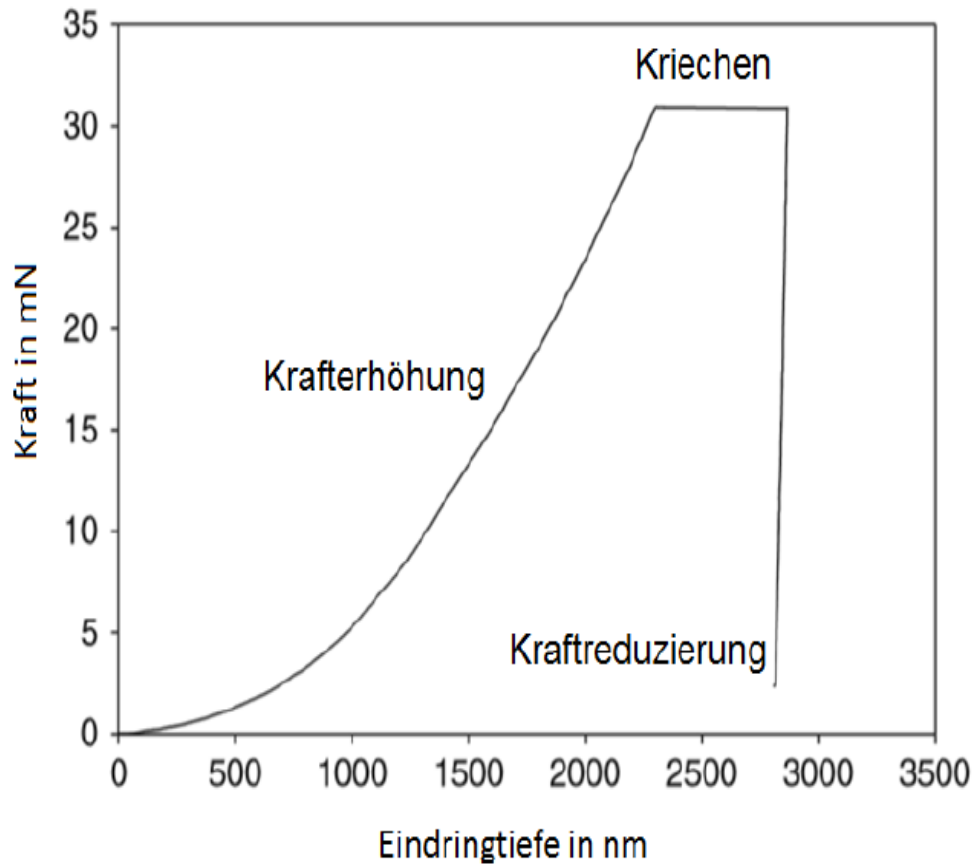


Abbildung 55: Darstellung eines Messergebnisses einer Nanoindentermessung
Zunächst wird die Kraft erhöht und die Eindringtiefe nimmt zu. Dann wird die Kraft konstant gehalten und die Eindringtiefe verändert sich allerdings nicht so stark wie bei der Krafterhöhung. Anschließend wird die Kraft reduziert, bis die Nanoindenter Spitze von der Probenoberfläche weg ist und keine Kraft mehr wirkt. Die Eindringtiefe ändert sich nicht mehr.

Für die Bestimmung der Kriechrate ist der Bereich mit konstanter Kraft von Bedeutung. Von diesem Teil kann auch die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden, siehe Abbildung 56.

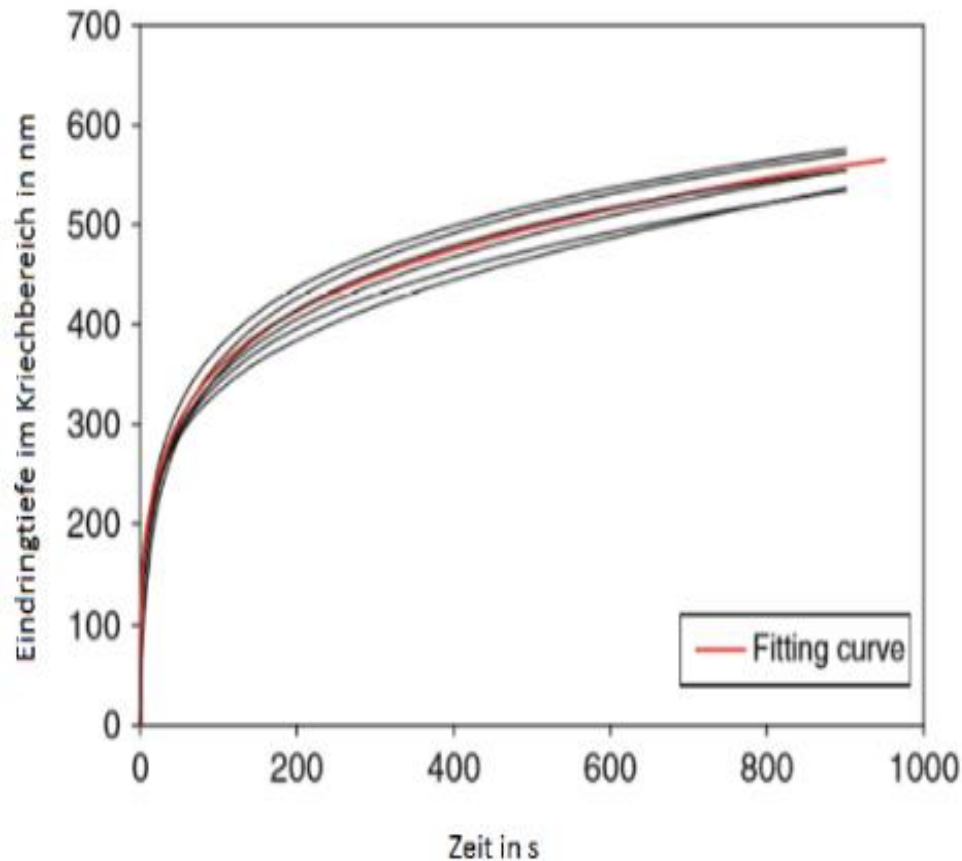


Abbildung 56: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Zeit
Die Eindringtiefe ändert sich mit der Zeit. Die Kraft ist konstant und wird nicht mehr erhöht. Diese Änderung der Eindringtiefe trotz konstanter Kraft tritt bei kriechenden Materialien, wie Lot, auf.

In Abbildung 56 wird nur der Zeitbereich abgebildet, bei dem die Kraft konstant ist. Die Kriechrate wird nun analog zur Berechnung der Kriechrate aus dem Zugversuch als relative Änderung der Eindringtiefe pro Zeit berechnet, siehe Gl. 31.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} \quad \text{Gl. 31}$$

Um die Kriechrate, wie in Abbildung 50, in Abhängigkeit der Spannung darstellen zu können, muss die Spannung unter der Indenterspitze, nach Gl. 28, bestimmt werden. Allerdings kann es bei der Nanoindentermessung noch zu zwei Effekten kommen, die die Bestimmung der projizierten Fläche komplizierter machen – Pile-Up-Effekt oder Sink-In-Effekt. [59] [60]

Pile-Up-Effekt und Sink-In-Effekt

Die beiden Effekte sind schematisch in Abbildung 57 dargestellt. Beim Sink-In-Effekt sinkt das Material um den Nanoindenter ein und reduziert die Kontakttiefe h_c und

somit auch die projizierte Fläche. Der Pile-Up-Effekt beschreibt die Wölbung um den Nanoindenter. Dabei erhöht sich die Kontakttiefe h_c . Mit Erhöhung der Kontakttiefe wird die projizierte Fläche größer. Weiche Materialien, wie das hier untersuchte Lot, neigen zu dem Pile-Up-Effekt [61].

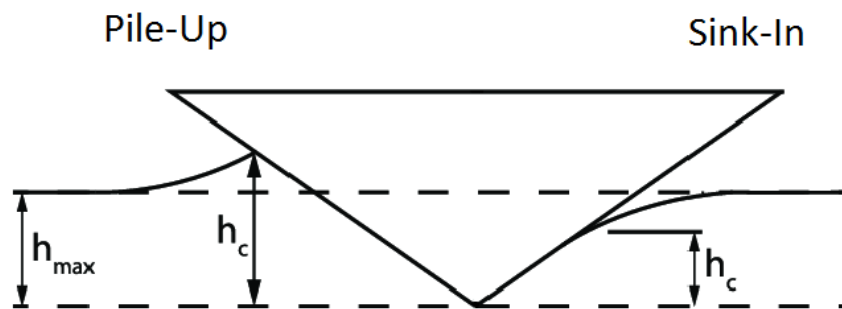


Abbildung 57: Schematische Darstellung der beiden Effekte: Pile-Up und Sink-In
Beim Pile-Up (links) erhöht sich die Eindringtiefe und die projizierte Fläche. Beim Sink-In (links) reduziert sich die Eindringtiefe und die projizierte Fläche.

Der Pile-Up-Effekt beschreibt die Wölbung um den Nanoindenter. Dabei erhöht sich die Kontakttiefe h_c . Mit Erhöhung der Kontakttiefe wird die projizierte Fläche größer. Weiche Materialien, wie das hier untersuchte Lot, neigen zu dem Pile-Up-Effekt.

Der Sink-In-Effekt tritt dagegen bei diesem Material weniger auf. Es ist möglich den Pile-Up-Effekt mithilfe eines Korrekturfaktors zu berücksichtigen. Dies ist wichtig, da sich aufgrund des Pile-Up-Effektes die Prüfkraft auf eine größere Fläche verteilt, dies ist schematisch in Abbildung 58 dargestellt.

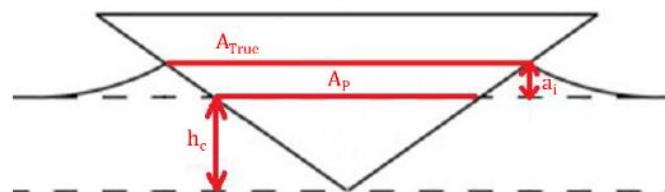


Abbildung 58: Schematische Darstellung des Pile-Up-Effektes mit dem Korrekturfaktor a_i
Bei Lot spielt nur der Pile-Up eine Rolle. Die projizierte Fläche erhöht sich zu A_{True} mit dem Korrekturfaktor a_i .

Die tatsächlich projizierte Fläche kann nach Gl. 32 berechnet werden [61].

$$A_{True} = A_p + h_c * 5,915 * \sum_1^4 a_i \quad \text{Gl. 32}$$

Dabei steht A_{True} für die tatsächlich projizierte Fläche mit Berücksichtigung des Pile-Up-Effektes, A_p für die projizierte ohne den Pile-Up-Effekt, h_c für die Kontakttiefe ohne Berücksichtigung des Pile-Up-Effektes und a_i für die Höhe des Pile-Ups an der i -ten Seite des Eindrucks. Der Vickers-Indenter hat als Grundfläche ein Viereck und deswegen muss an vier Seiten der Pile-Up gemessen werden. Der Pile-Up-Effekt kann mithilfe von AFM-Messungen (engl. für atomic force microscope) gemessen werden. Abbildung 59 zeigt die AFM-Aufnahme eines Nanoindenterabdrucks an einer Lotstelle des Mikrofons (a) und die Oberflächentopografie einer Messstelle mit Pile-Up (b) [49].

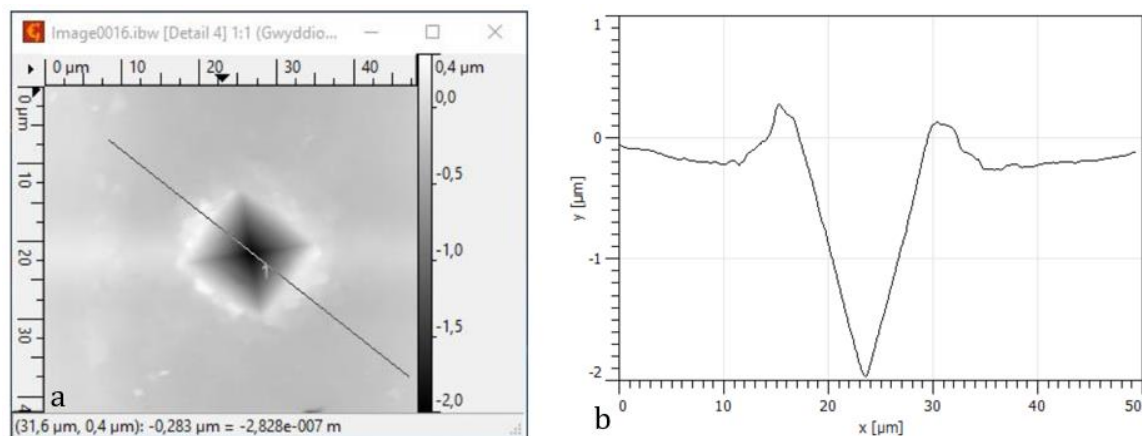


Abbildung 59: Darstellung einer Messstelle (a) mit AFM-Aufnahme (b) [49]

Der Pile-Up ist rechts dargestellt. Für jede Lotstelle, die mit dem Nanoindenter vermessen wurde, muss eine AFM-Messung durchgeführt und anschließend der Korrekturfaktor a_i bestimmt.

Ergebnisse der Nanoindentermessung

Das Ergebnis der Nanoindentermessung aus [49] ist in Abbildung 60 dargestellt.

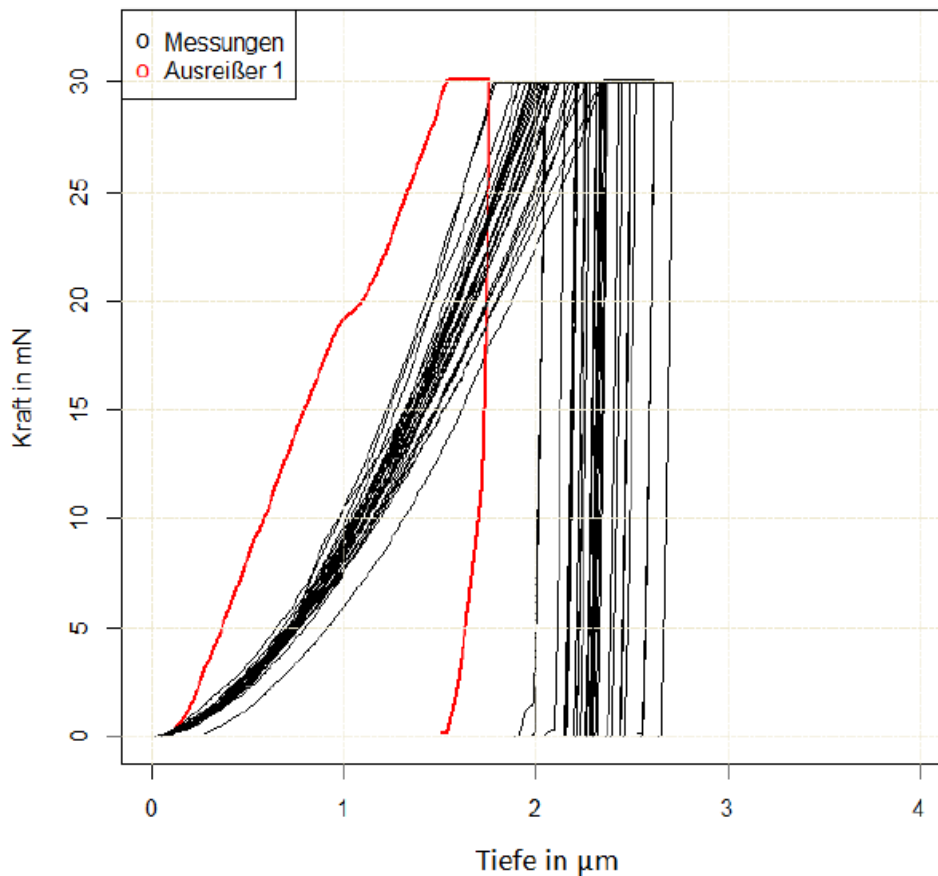


Abbildung 60: Ergebnisse der Nanoindentermessung aus [49]

Es sind 30 Messungen durchgeführt worden. Die einzelnen Messungen sind dargestellt. Es ist die Krafterhöhung, die Konstanthaltung der Kraft und die Kraftreduzierung zu erkennen. Anschließend wird mithilfe der Umrechnung die Kriechrate bestimmt

Dabei ist zu erkennen, dass es bei 30 Messungen einen Ausreißer gibt. Da von jeder Messstelle ein Mikroskopbild aufgenommen wurde, fällt bei dem Ausreißer auf, dass die Kanten der Eindruckstelle deutlich verschmiert sind. Bei der Probenpräparation dieses Ausreißers kam es dazu, dass beim Schleifvorgang deutlich größere Kratzer dem Material hinzugefügt worden sind. Die beiden Abbildung 61 a und b zeigen den Unterschied zwischen der Mikroskopaufnahme des Ausreißers (Abbildung 61 a) und einer normal durchgeführten Messung (Abbildung 61 b). Daher wird der Ausreißer für die folgende Betrachtung der Bestimmung der Kriechrate weggelassen. [49]

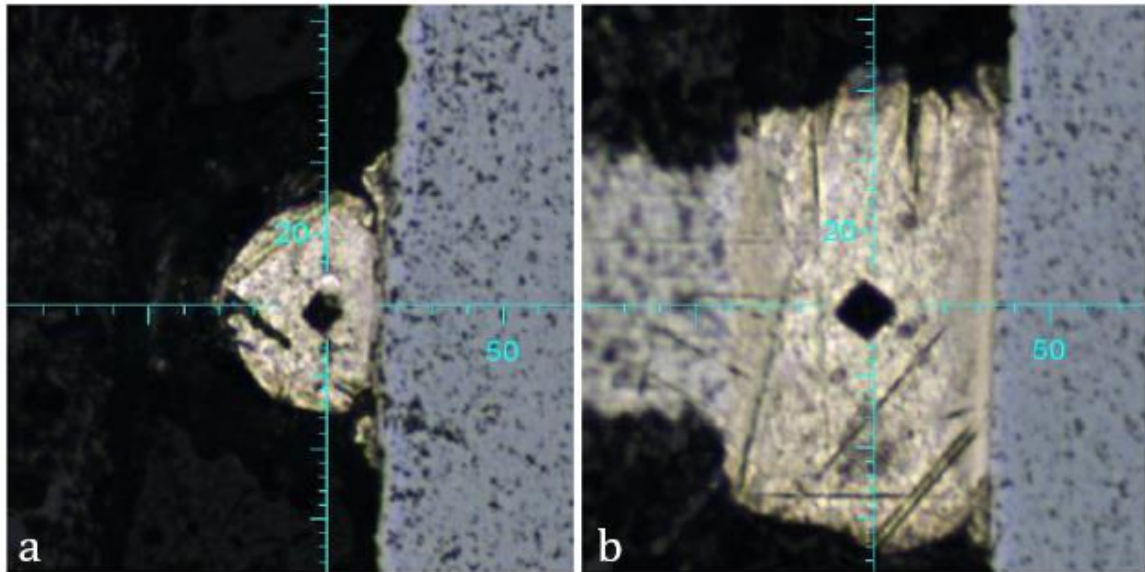


Abbildung 61: Darstellung zweier Messstellen [49]

Das linke Bild (a) zeigt größere Kratzer und verschwommene Kanten an der Eindringstelle in der Mikroskopaufnahme. Daher kommt es bei (a) zu einem Ausreißer in der Nanonindentermessung. Das rechte Bild (b) zeigt eine Mikroskopaufnahme einer normalen Messung mit deutlich dünneren Kratzern und klaren Kanten an der Eindringstelle.

Der Ausreißer wird für die Bestimmung der Kriechrate nicht berücksichtigt. Die Messungen aus Abbildung 60 werden unter Berücksichtigung des Pile-Up-Effektes zur Kriechrate umgerechnet. Bei den Messungen ergeben sich aufgrund des Mikrogefüges der gemessenen Lotstellen Streuungen. Trotz der Streuungen der Einzelproben wurde ein arithmetischer Mittelwert der Kriechwerte im arithmetischen Mittel der Spannung bestimmt, siehe Abbildung 62. Die Kriechrate wurden mit der oben beschriebenen Umrechnung bestimmt.

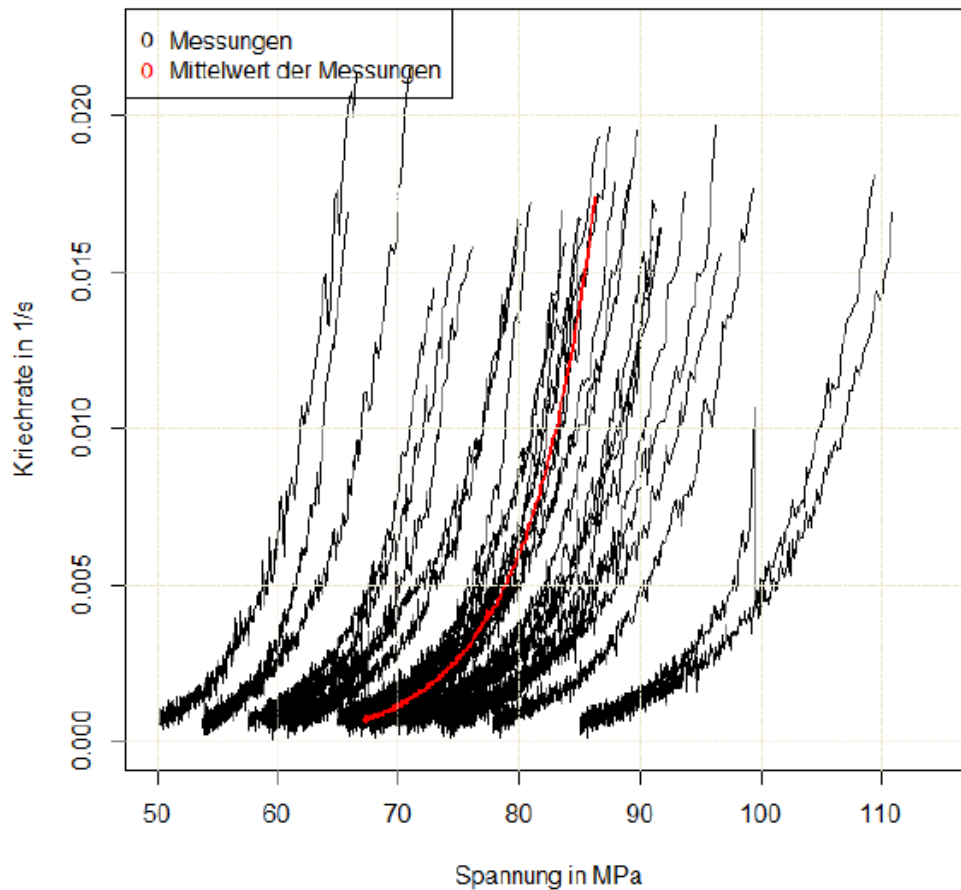


Abbildung 62: Kriechraten der Messungen mit arithmetischem Mittelwert [49]
Die Messungen wurden zu den Kriechraten umgerechnet und anschließend der arithmetische Mittelwert bestimmt.

Mit der Standardabweichung ergibt sich graphisch betrachtet der folgende Mittelwert für die Kriechrate, siehe Abbildung 63.

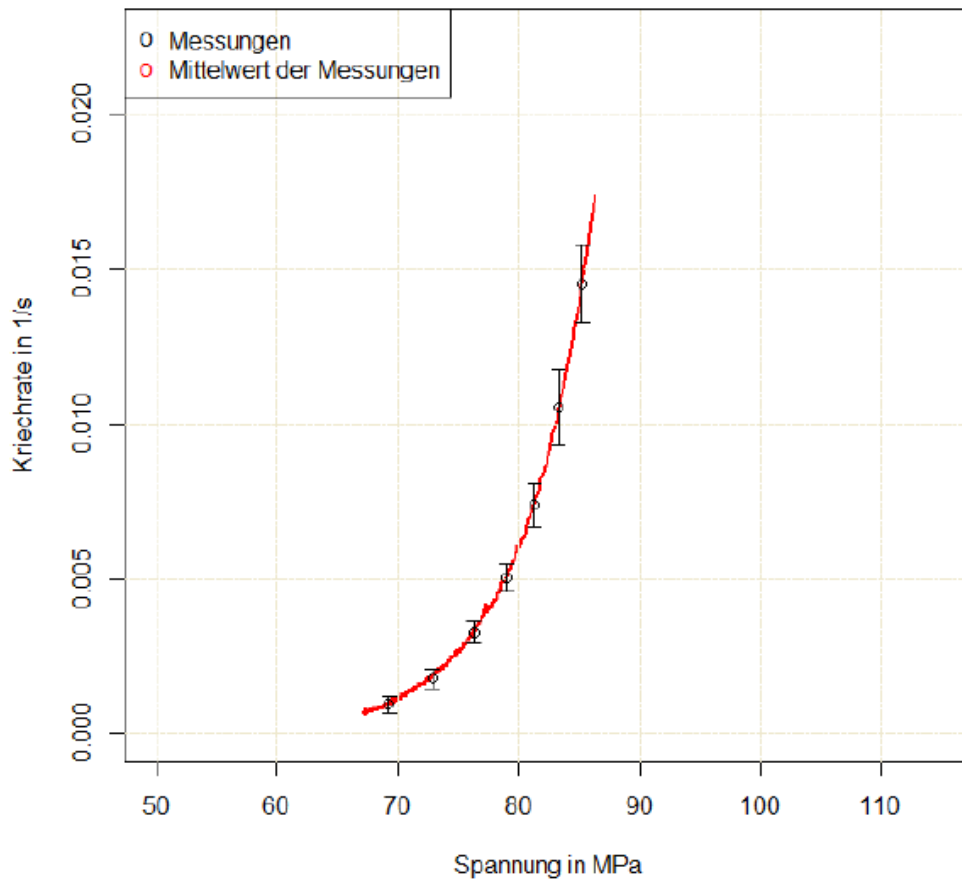


Abbildung 63: Kriechrate Nanoindenter mit Standardabweichung [49]

An diese Kriechrate wird mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate das Garofalo-Modell angefitet.

Zur Bestimmung der Koeffizienten wurde an diesen Mittelwert der Messungen ein mathematischer Fit durchgeführt. Der mathematische Fit wurde mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt [61]. Durch den Fit ergibt sich für die Kriechrate aus der Nanoindentermessung eine Kriechrate mit den folgenden Koeffizienten für das Garofalo-Modell, siehe Gl. 33. Diese Kriechrate wird ab hier als Kriechrate Nanoindenter bezeichnet [49].

$$\dot{\epsilon} = 105,4 \frac{1}{s} * \left(\sinh \left(0,027 \frac{1}{\text{MPa}} * \sigma \right) \right)^{5,956} * \exp \left(\frac{-45226,4 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{R * T} \right) \quad \text{Gl. 33}$$

3.4.3. Simulativer Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter

Abbildung 64 zeigt einen Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter aus Gl. 26 und Gl. 33. Für die vorliegende Arbeit ist der Spannungsbereich von 40 bis 100 MPa relevant.

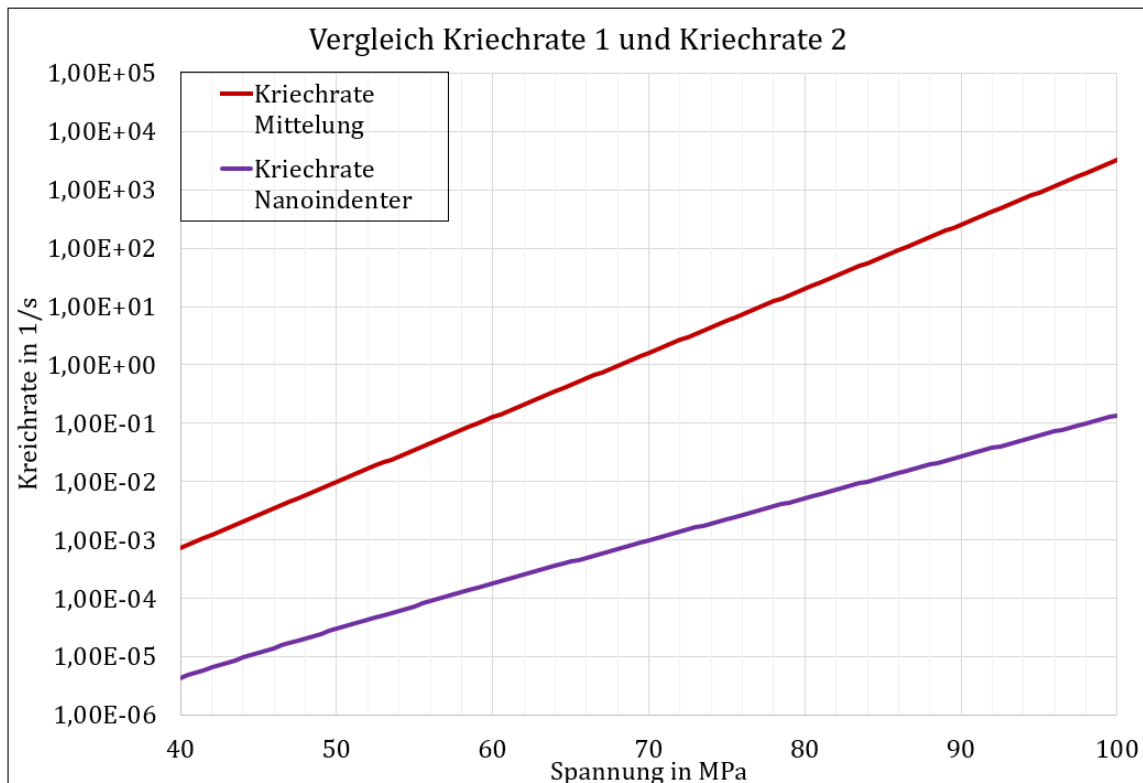


Abbildung 64: Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter
Die beiden Kriechraten für die gleiche Lotlegierung unterscheiden sich eindeutig um bis zu vier Größenordnungen

Es fällt auf, dass sich die beiden Kriechraten um einige Größenordnungen unterscheiden. Je nach Spannungsbereich unterscheiden sie sich um bis zu ca. vier Größenordnungen.

Um zu entscheiden, welche Kriechrate das Verhalten des Lots in den MEMS-Mikrofonen realistisch beschreibt, wurde ein simulativer Vergleich der beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter durchgeführt. Die Simulationen werden anschließend mit Messdaten der Mikrofonempfindlichkeit verglichen.

Messungen zur Temperaturhysterese

Bei Messungen der Empfindlichkeiten von MEMS-Mikrofonen nach einem Temperprozess wird eine Hysterese beobachtet. Die Ursachen der Temperaturhysterese sind die thermische Ausdehnung und das anschließende Kriechen der Lotstellen. Für genauere Untersuchungen wurde eine Versuchsreihe mit zehn Mikrofonen durchgeführt.

Zunächst wurden jeweils die Anfangswerte der Empfindlichkeit vor dem Temperprozess bestimmt. Anschließend wurden die Mikrofone bei 90 °C in einem Ofen für eine Stunde getempert. Nach dieser Zeit wurden die Mikrofone aus dem Ofen herausgenommen und nach verschiedenen Zeiten die Empfindlichkeit wiederholt bestimmt. Die erste Messung der Empfindlichkeit erfolgte nach ca. 30 Sekunden. Danach erfolgten weitere Messungen in regelmäßigen Abständen bis zu einer Zeit von vier Stunden. Um Einflüsse der äußeren Umgebung ausschließen zu können, wurde eine Kontrollgruppe von fünf Mikrofonen mitgemessen, die nicht getempert wurden. Die Messungen wurden mit der in Abschnitt 2.3.2. beschriebenen Messapparatur durchgeführt.

Anschließend wurden die jeweiligen Abweichungen der Empfindlichkeit vom Ausgangswert bestimmt. Für die Empfindlichkeitsabweichung wird die Differenz zwischen dem Ausgangswert und dem Wert zum Zeitpunkt t bestimmt.

Simulationen zur Temperaturhysterese

Zum Vergleich wurden Simulationen mit den beiden Kriechraten Mittelung und Nanoindenter durchgeführt. Die Zeit- und Temperaturverläufe entsprachen denen der experimentellen Messung. Auch hier wurde nach Abweichungen der Mikrofonempfindlichkeit ausgewertet.

Das Ergebnis der Simulationen im Vergleich zu der Messung ist in Abbildung 65 dargestellt. Der Fehlerbalken bei den Messwerten entspricht der Standardabweichung bei zehn Mikrofonen. Die Simulationen haben keinen Fehlerbalken, da diese einmal durchgeführt wurden und bei einer nochmaligen Berechnung das gleiche Ergebnis berechnet würde.

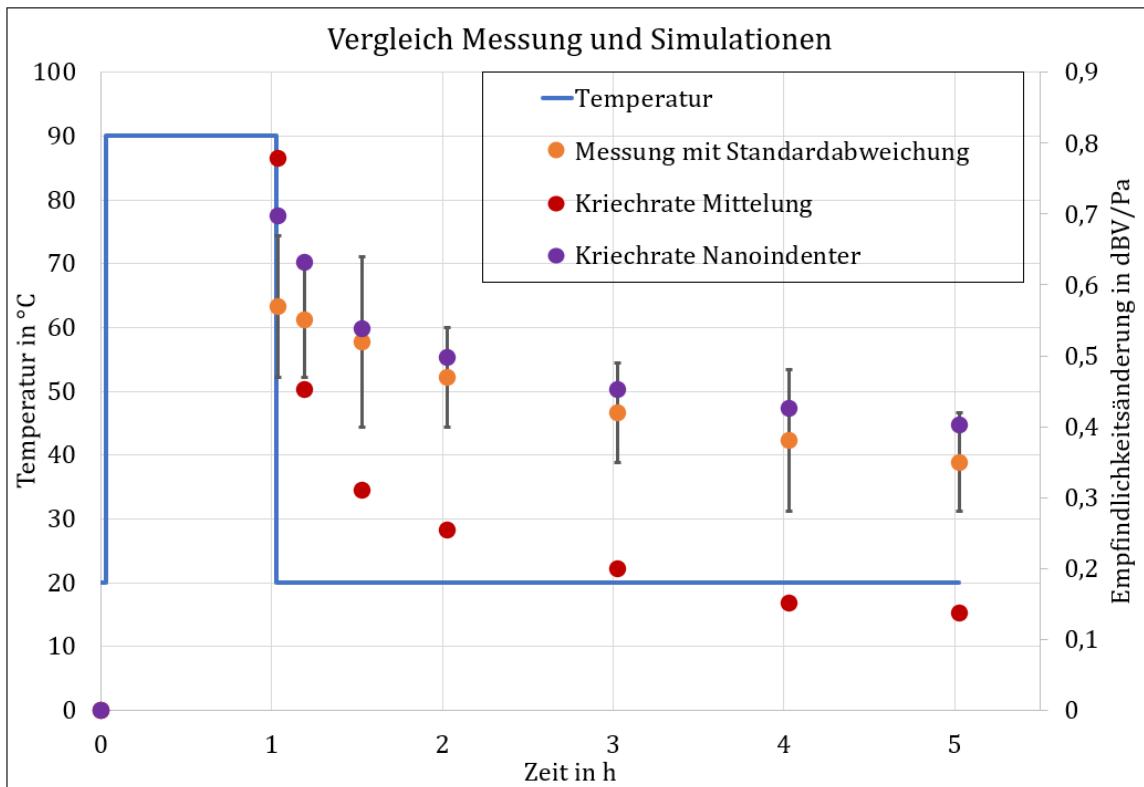


Abbildung 65: Vergleich der Simulationen mit experimentellen Daten

Die Temperaturhysterese ist sowohl bei den Simulationen als auch bei der experimentellen Messung erkennbar. Die Simulationen mit der Kriechrate Mittelung unterscheiden sich stark von den experimentellen Messungen. Die Simulationen mit der Kriechrate Nanoindenter und die experimentellen Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung. Daher wird für weitere Simulationen die Kriechrate Nanoindenter verwendet.

In Abbildung 65 ist zu erkennen, dass für die Simulationen mit der Kriechrate Mittelung der berechnete Rückgang der Empfindlichkeitsabweichung deutlich schneller ist als bei den gemessenen Werten. Die Simulationen mit der Kriechrate Nanoindenter spiegeln dagegen das zeitliche Verhalten der Mikrofonempfindlichkeit sehr gut wider.

Daher werden für die nachfolgenden Simulationen die Kriechrate aus 3.4.2. und Gl. 33 für das Kriechverhalten der Mikrofone verwendet. Da nun die Kriechrate gefunden wurde, die ein realistisches Ergebnis für die Simulation liefert, ist es möglich weitere Simulationen durchzuführen.

3.5. Simulation der Temperaturhysterese

Unter Verwendung der Kriechrate Nanoindenter können Einflüsse der Temperatur auf die Empfindlichkeit der MEMS-Mikrofone simulativ untersucht werden. In dieser Arbeit werden zwei Temperaturverläufe simulativ und messtechnisch untersucht.

In der ersten Versuchsreihe werden 20 Mikrofone bei 100 °C für 90 Minuten getempert und anschließend wird die Empfindlichkeit nach dem Tempervorgang bis zu einer Zeit von sechs Stunden bei Raumtemperatur gemessen. Um die Empfindlichkeitsabweichung auswerten zu können, wurde die Empfindlichkeit zunächst vor dem Tempervorgang bestimmt. Die Messungen wurden mit der Messvorrichtung, die in Kapitel 2.3.2. beschrieben ist, durchgeführt. Die experimentelle Bestimmung der Temperaturhysterese wird anschließend mit den Simulationen verglichen. Die Ergebnisse dieser Messung und der Simulationen sind in Abbildung 66 dargestellt.

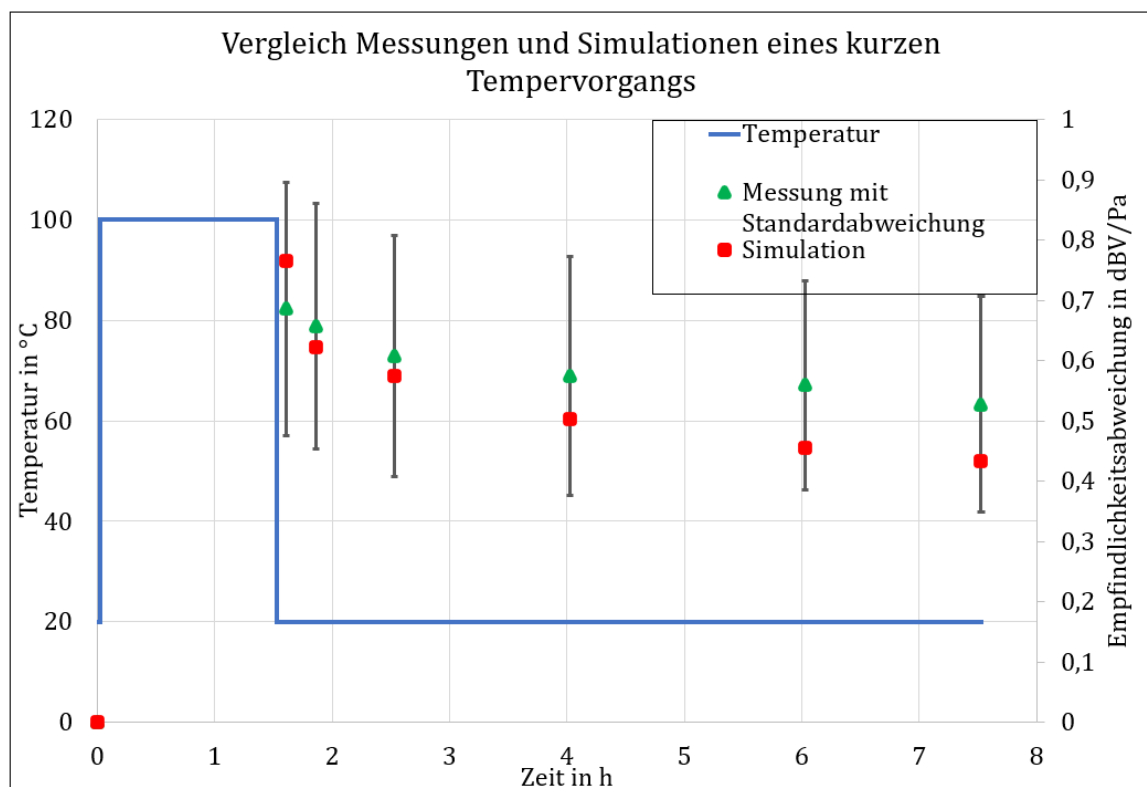


Abbildung 66: Ergebnis des Vergleichs von Messungen und Simulationen bei einem kurzen Temperprozess

Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der experimentellen Messung und der Simulationen mit Kriechrate Nanoindenter.

Es ist zu erkennen, dass die Messungen und die Simulationen den gleichen Verlauf der Temperaturhysterese zeigen. Es wird deutlich, dass auch ca. sechs Stunden nach dem Tempervorgang die Empfindlichkeit noch sehr weit vom Ausgangswert abweicht. Dies liegt daran, dass die thermisch induzierten Spannungen noch vorhanden sind.

Um zu untersuchen, ob und bzw. nach welcher ungefähren Zeit nach dem Temperprozess sich die Empfindlichkeit wieder ihrem Ausgangswert annähert, wird eine zweite Messreihe über einen viel längeren Zeitraum durchgeführt.

Dazu wurden 20 Mikrofone für 24 Stunden bei 120 °C getempert. Auch bei dieser Versuchsreihe wurde für die Empfindlichkeitsabweichung die Mikrofonempfindlichkeit vor dem Temperprozess bestimmt. Die Empfindlichkeit wurde für einen Zeitraum bis zu 1000 Stunden (ca. 6 Wochen) nach dem Tempervorgang gemessen. Zum Vergleich mit diesen Messungen wurden Simulationen mit gleichem Zeit- und Temperaturverlauf durchgeführt. Die Ergebnisse von den Messungen und den Simulationen sind in Abbildung 67 mit linearer Zeitachse dargestellt. Es zeigt sich, dass erst nach einer Zeit von 800 – 1000 Stunden die Empfindlichkeit der Mikrofone den Anfangswerten sehr nahekommen. Noch 200 Stunden nach der Temperung weichen die gemessenen Empfindlichkeiten mehr als 0,2 dBV/Pa von den Anfangswerten ab.

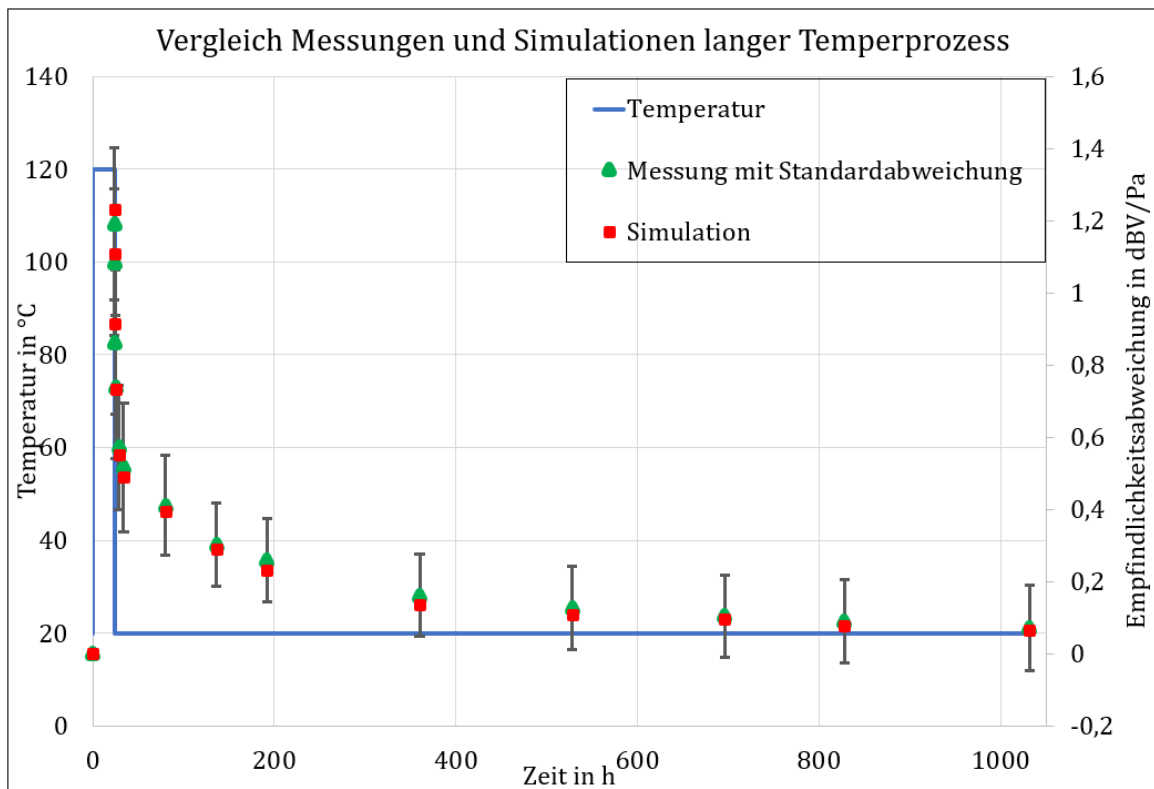


Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung nach einem 24 Stunden dauernden Temperprozess mit Vergleich von Messung und Simulationen

Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist sehr gut. Beide Verläufe zeigen den gleichen Verlauf.

In Abbildung 68 ist dieser Vergleich von Messung und Simulation in logarithmischer Darstellung der Zeitachse aufgetragen. Die Empfindlichkeitsabweichungen in der Anfangszeit (kurz nach dem Ende der Temperung) sind hier besser zu erkennen.

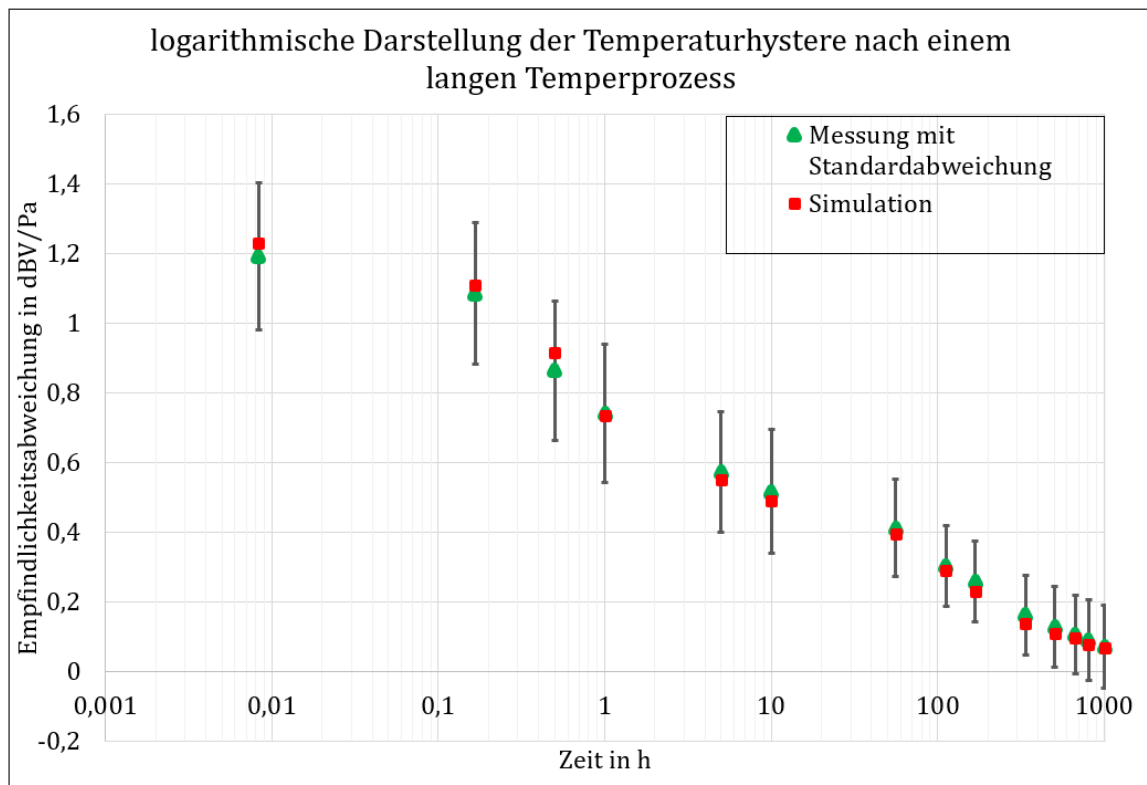


Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung nach einem 24 Stunden dauerndem Temperprozess mit logarithmischer Zeitachse

Hier zeigt sich die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Der Anfang der Messung und Simulation ist gut zu erkennen.

Die Verläufe der Empfindlichkeitsabweichungen von Messung und Simulation sind sehr ähnlich. Die geringen Abweichungen sind vor allem dadurch zu erklären, dass bei der Messung der Mittelwert der Messung dargestellt ist. Der Simulationswert befindet sich sogar meist im Zentrum des Bereichs der Standardabweichung des Messwertes. Abbildung 67 zeigt, dass auch nach 1000 h die thermisch induzierten Spannungen noch nicht ganz relaxiert sind. Die gute Übereinstimmung der Ergebnisse dieser Simulationen mit den experimentellen Daten zeigt, dass bei Verwendung der Kriechrate Nanoindenter in den Simulationen das thermische Verhalten der Mikrofone sehr gut abgebildet werden kann.

3.6. Simulation verschiedener Lothöhen

Im Folgenden wird der Einfluss der Lothöhe auf die Empfindlichkeitsabweichung untersucht. Bei den vorher untersuchten Mikrofonen beträgt die Lothöhe $h_{\text{Lot}} = 90 \mu\text{m}$. Für die weiteren Untersuchungen wird die Höhe der Lotstellen zunächst um $1/3$ verringert, d. h. die Lothöhe beträgt nun $h_{\text{Lot}} = 60 \mu\text{m}$, und anschließend zum einen um $1/3$ erhöht ($h_{\text{Lot}} = 120 \mu\text{m}$) und zum anderen für die letzte Berechnung um $2/3$ erhöht ($h_{\text{Lot}} = 150 \mu\text{m}$). Die Durchmesser der Lotstellen wurde für die unterschiedlichen Höhen angepasst und entspricht der Höhe der Lotstellen. Für die Form der Lotstellen wurde eine konvexe Form gewählt. Für diesen Vergleich wurde der Temperaturverlauf aus Abbildung 67 mit den unterschiedlichen Lothöhen simuliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 69 dargestellt.

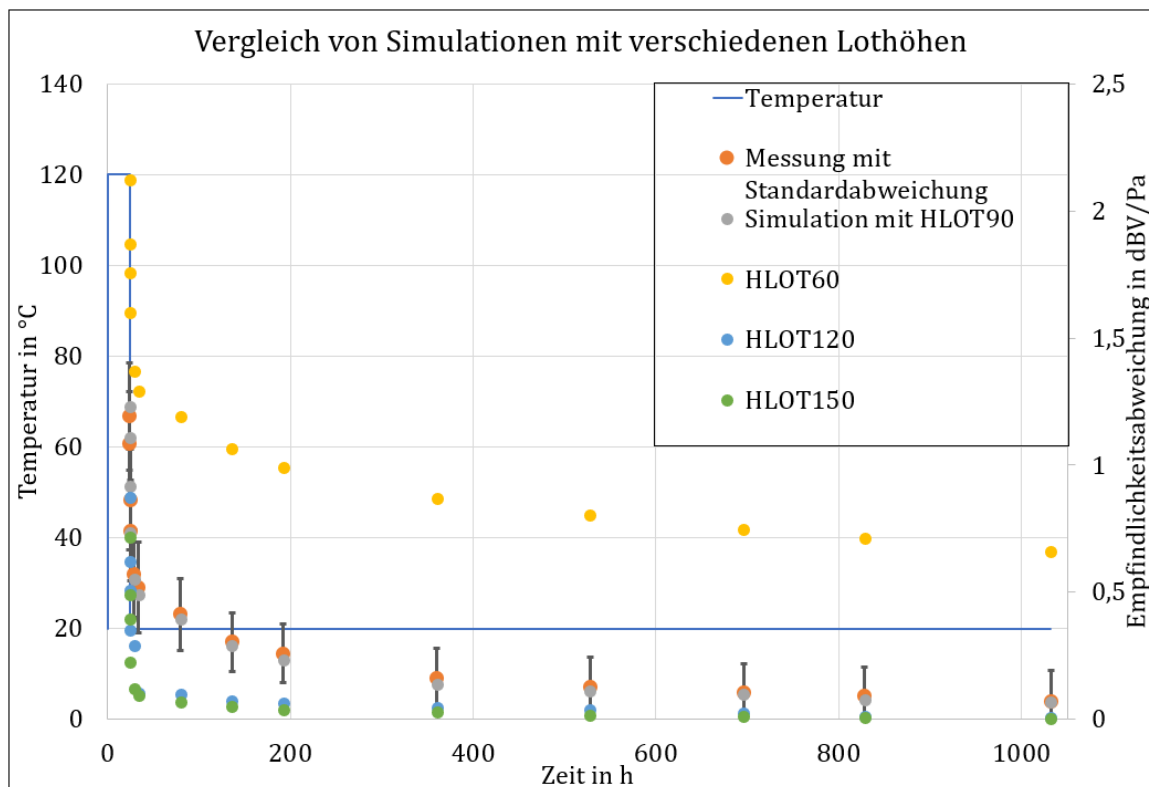


Abbildung 69: Vergleich der Simulationen mit Mikrofonen mit unterschiedlichen Lothöhen. Der Verlauf der Temperaturhysterese ist bei allen Lothöhen ähnlich. Die Lothöhe hat einen Einfluss auf die Temperaturhysterese.

Abbildung 70 zeigt den Verlauf der Temperaturhysterese mit der Abszisse in logarithmischer Darstellung. Dadurch ist der Anfangsbereich gut zu erkennen.

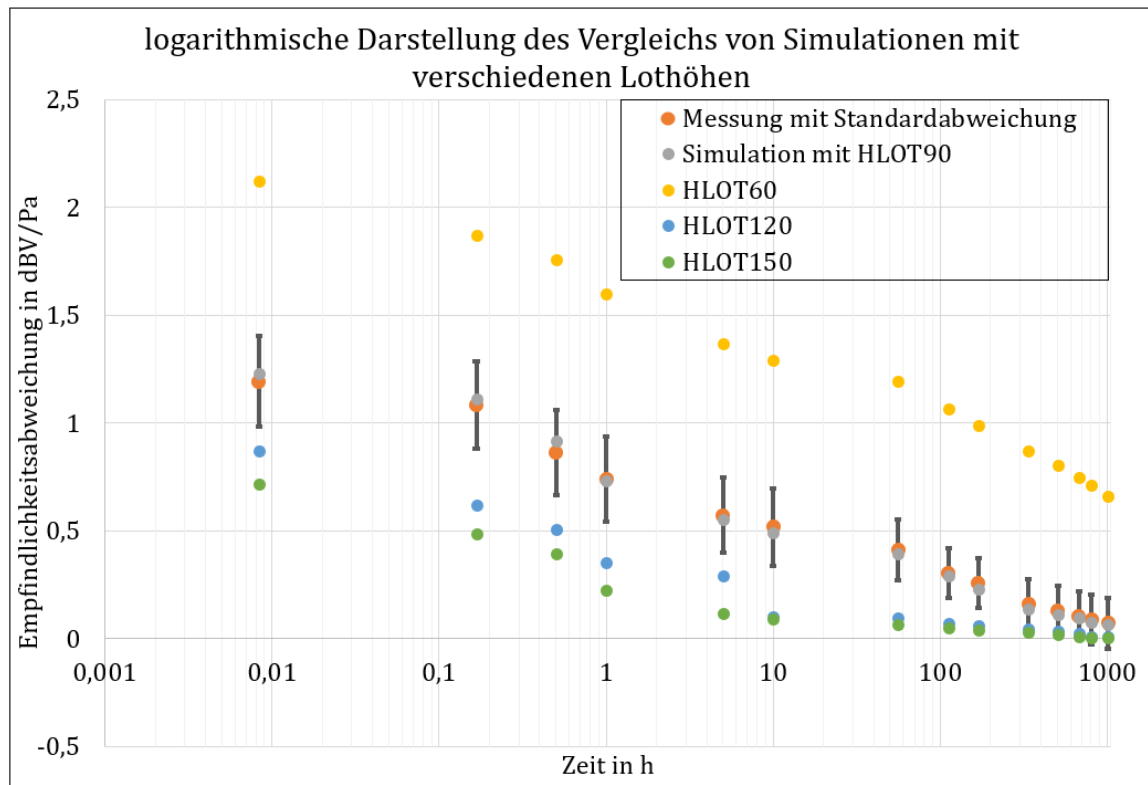


Abbildung 70: Anfangsbereich der Messung und Simulationen aus Abbildung 69
Der Verlauf der Temperaturhysterese ist bei allen Lothöhen ähnlich. Die Lothöhe hat einen Einfluss auf die Temperaturhysterese.

Aus Abbildung 69 und Abbildung 70 ist zu erkennen, dass der Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung bei allen Lothöhen sehr ähnlich ist. Zunächst ist die Empfindlichkeitsabweichung zum Anfangswert nach dem Temperprozess hoch, nimmt aber im Laufe der Zeit ab. Es ist auch zu erkennen, dass die Empfindlichkeitsabweichung mit Zunahme der Höhe der Lotstellen geringer wird. Dies liegt daran, dass es aufgrund der größeren Lötmenge, die als Ausgleichsmaterial zwischen MEMS-Chip und Trägerkeramik wirkt, zu einer geringeren Stauchung der Membran kommt. Dies deckt sich auch mit experimentellen Untersuchungen aus [17]. In [17] durchliefen MEMS-Mikrofone mit Lothöhen von $h_{\text{Lot}} = 90 \mu\text{m}$ und $h_{\text{Lot}} = 120 \mu\text{m}$ einen Reflowprozess und anschließend wurde die Empfindlichkeit gemessen. Es wurde eine weitere Empfindlichkeitsmessung nach einer Woche durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Empfindlichkeitsänderung bei den Mikrofonen mit einer Höhe der Lotstelle von $h_{\text{Lot}} = 90 \mu\text{m}$ höher ($(2,58 \pm 0,23) \text{ dBV/Pa}$) war als bei den Mikrofonen mit einer Lothöhe von $h_{\text{Lot}} = 120 \mu\text{m}$ ($(1,73 \pm 0,34) \text{ dBV/Pa}$). Nach einer Woche lag die Empfindlichkeitsabweichung der Mikrofone mit einer Höher der Lotstellen von $h_{\text{Lot}} = 90 \mu\text{m}$

bei $(0,56 \pm 0,12)$ dBV/Pa und bei den Mikrofonen mit einer Höhe der Lotstellen von $h_{\text{Lot}} = 120 \mu\text{m}$ bei $(0,20 \pm 0,34)$ dBV/Pa.

3.7. Einfluss der Wölbung der Lotstellen

Um zu zeigen, dass mithilfe der Simulationen Veränderungen an den Lotstellen berechnet werden können, wird dies im Folgenden anhand der Wölbung der Lotstellen dargestellt. Dies ist ein Gedankenspiel, um zu zeigen, dass mithilfe der Simulationen die unterschiedlichsten Effekte betrachtet werden können. Beim Löten bilden sich die Lotstellen aufgrund ihrer Oberflächenspannung konvex aus, allerdings könnte dies einen Einfluss auf die Temperaturhysterese haben. Falls dem so wäre, wäre es möglicherweise wünschenswert die Lotstellen in ihrer konvexen Ausprägung zu hindern und in eine konkave Wölbung zu drängen. In Abbildung 71 a und b sind zwei Lotstellen aus dem vernetzten Modell der Simulation dargestellt. Bei der linken Lotstelle (Abbildung 71 a) handelt es sich um eine konvexe Lotstelle und bei der rechten Lotstelle (Abbildung 71 b) um eine konkave Lotstelle.

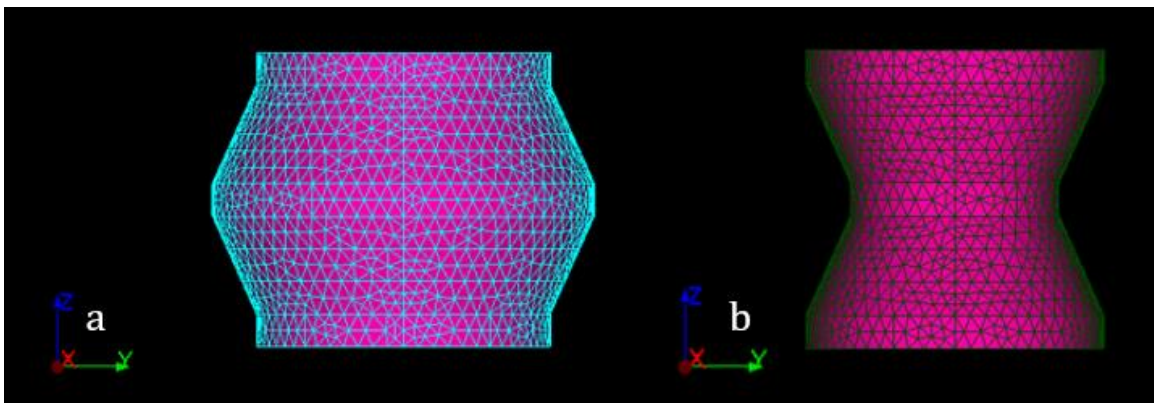


Abbildung 71: Links (a) ist eine Lotstelle mit konvexer Ausprägung dargestellt. Rechts (b) ist eine Lotstelle mit deutlich konkaver Ausprägung dargestellt. Die beiden Lotstellen unterscheiden sich in ihrer Wölbung. Wenn es wünschenswert ist, kann in der Simulation die Form der Lotstelle angepasst werden.

Um den Einfluss der Wölbung der Lotstellen zu untersuchen, wurde ein Langzeittest, wie der in Abbildung 67 dargestellte, mit konkaven Lotstellen durchgeführt und zum Vergleich eine Simulation mit vier konvexen Lotstellen durchgeführt (in Abbildung 67). Es wurden dafür insgesamt fünf Anpassungen im Geometriemodell vorgenommen. Zunächst wurde nur eine Lotstelle konkav modelliert (Konkav1). In der nächsten Modellierung wurden zwei Lotstellen als konkav angenommen.

Hierbei wurde unterschieden, ob sich die beiden konkaven Lotstellen nebeneinander (Konkav2Neben) oder gegenüber (Konkav2Gegen) befinden. Danach wurden drei konkave Lotstellen modelliert (Konkav3). Zuletzt wurden alle vier Lotstellen mit einer konkaven Ausprägung modelliert (Konkav4).

Nach der Modellierung wurde für jedes Modell eine Simulation durchgeführt. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 72 dargestellt. Abbildung 73 zeigt die Ergebnisse aus Abbildung 72 mit der logarithmischen Darstellung der Zeitachse.

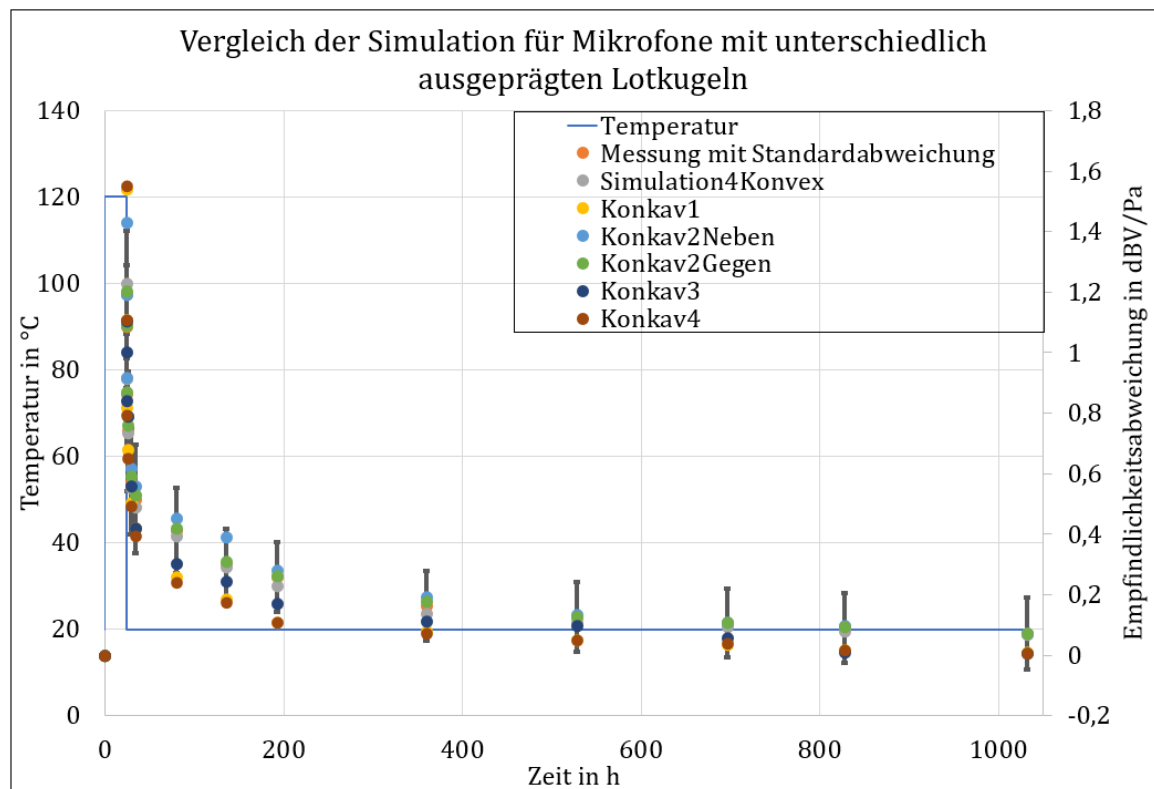


Abbildung 72: Ergebnis der Simulation von Mikrofonen mit unterschiedlich ausgeprägten Lotkugeln

Es sind die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit (linke Ordinate) und die Empfindlichkeitsabweichung in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Die Temperaturhysterese ist deutlich zu erkennen. Die Wölbung der Lotstellen hat keinen starken Einfluss auf die Temperaturhysterese.

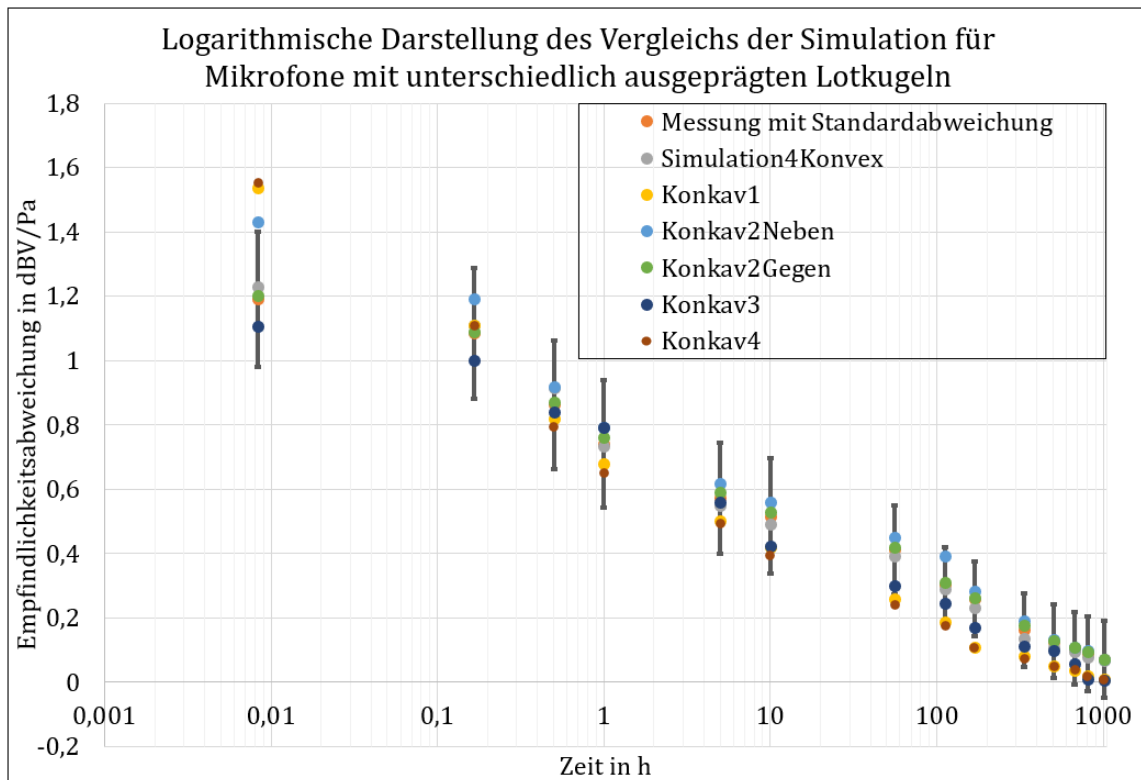


Abbildung 73: Empfindlichkeitsabweichung nach einem langen Temperprozess mit logarithmischer Darstellung der Zeit

Die Simulation und die Messung zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Wölbung der Lotstellen hat keinen erheblichen Einfluss auf die Temperaturhysterese.

Abbildung 73 zeigt, dass die Empfindlichkeitsabweichungen aufgrund der Ausprägung der Lotstellen nicht sehr unterschiedlich sind. Bei der konkaven Ausprägung einer Lotstelle steigt die Empfindlichkeit etwas stärker als bei dem Modell mit vier konvexen Lotstellen. Außerdem geht sie früher auf den Ausgangswert zurück. Bei zwei Lotstellen, die sich konkav ausgebildet haben, muss für das Verhalten der Temperaturhysterese unterschieden werden, ob sich die Lotstellen nebeneinander oder gegenüber konkav ausgebildet haben. Bei zwei konkav nebeneinander ausgebildeten Lotstellen ist die Empfindlichkeitsabweichung nach dem Temperprozess größer als bei zwei gegenüber konkav ausgeprägten Lotstellen. Des Weiteren geht im zeitlichen Verlauf die Empfindlichkeit bei zwei gegenüberliegenden konkav ausgebildeten Lotstellen schneller auf den Anfangswert zurück im Vergleich zu zwei nebeneinander konkaven Lotstellen. Bei drei konkaven Lotstellen zeigt sich eine geringere Empfindlichkeitsabweichung zu Beginn der Betrachtung und ein schnelles Abflachen der Empfindlichkeit hin zum Anfangswert.

Falls sich alle vier Lotstellen konkav ausgebildet haben, hat der Temperprozess zunächst einen etwas größeren Einfluss auf die Empfindlichkeit. Allerdings geht die Empfindlichkeit schneller auf ihren Anfangswert zurück.

Insgesamt zeigt Abbildung 73 jedoch, dass die Ausprägung der Lotstellen zwar einen Einfluss auf die Empfindlichkeit der Mikrofone nach einem Temperprozess hat, allerdings eher eine untergeordnete Rolle spielt und die Mikrofone ein gleiches Verhalten zeigen und sich die Werte nach Abbildung 73 noch im Bereich der Standardabweichung befinden.

4. Diskussion

4.1. Simulationen in der Simulationsumgebung Code-Aster

In Kapitel 3 konnte gezeigt werden, dass mithilfe der Simulationsumgebung Code-Aster glaubwürdige und realistische Ergebnisse simulativ berechnet werden können. Die Simulationsumgebung Code-Aster hat den Vorteil, dass es sich dabei um eine kostenfreie Open-Source-Software handelt. Kommerzielle Simulationsprogramme, wie Ansys oder Comsol, kosten in etwa zwischen 5000€ und 10 000 € oder mehr, wenn spezielle Module noch dazugebucht werden [62] [63]. Code-Aster ist für kleinere Unternehmen nützlich, die entweder die Kosten für die kommerziellen Simulationsprogramme scheuen oder zunächst erste einfachere Simulationen durchführen wollen. Code-Aster eignet sich auch sehr gut für den Einstieg in das Thema Simulation. Durch die iterative Vorgehensweise, aber auch durch die Möglichkeit den Berechnungsschritt als Textcode selbst zu verfassen, sind alle Schritte für den Nutzer gut nachvollziehbar. Der Nutzer sollte sich vor Beginn des Aufsetzens der Simulation bewusst sein, was berechnet werden soll. Bei der Simulation mithilfe von kommerziellen Simulationen kommt man zwar schneller zum Ziel, allerdings verlässt man sich eventuell zu schnell auf das Ergebnis. In der Simulationsumgebung Code-Aster hinterfragt man das Ergebnis viel mehr, da es keine vorgefertigten Datenbanken vor allem zum Materialverhalten gibt. Die Materialparameter müssen selbst bestimmt werden. In kommerziellen Programmen sind diese meist in einer Datenbank hinterlegt.

Des Weiteren lassen sich in Code-Aster viele Schritte automatisieren. Wurde beispielsweise eine Geometrie einmal erstellt, ist es möglich diese zu parametrisieren und bei Bedarf anzupassen. Außerdem ist es möglich, wenn beim Erstellen der Geometrie auf die Gruppennamen geachtet wird, die gleiche Berechnungsdatei zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass die Berechnungsdateien nicht immer wieder neu aufgestellt werden müssen, da es dabei zu Fehlern kommen kann und die Fehler dann zeitaufwendig gesucht und dann eliminiert werden müssen. Es hat sich innerhalb dieser Arbeit herausgestellt, dass es bei Simulation in der Simulationsumgebung Code-Aster sinnvoll sein kann zunächst kleinere Teilsimulationen durchzuführen, die nicht das ganze Modell mitberechnen, sondern zunächst nur die kritischen Bereiche.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die Auslenkung der Membran für sich betrachtet und alleinstehend betrachtet. Für die Bestimmung der Empfindlichkeit ist die Membranauslenkung verantwortlich. Bei der Simulation der Auslenkung der Membran hat sich gezeigt, dass diese von der Vorspannung und dem E-Modul abhängig ist siehe Abbildung 37. Bei der analytischen Betrachtung ist die Membranauslenkung nach [23] nur von der Vorspannung abhängig, vgl. Abbildung 38. Dieses Ergebnis zeigt, dass durch die Simulationen genauere Ergebnisse erzielt werden können, da in der Simulation auch Faktoren berücksichtigt werden, die eine untergeordnete Rolle spielen.

Nach der Betrachtung der Membranauslenkung wurden die weiteren Elemente, wie MEMS-Chip, Lotkugeln und Trägerkeramik, in das Geometriemodell aufgenommen. Daraufhin schien es möglich, dass das Temperaturverhalten der Mikrofone mithilfe der Simulation abgebildet werden kann. Allerdings zeigten erste Simulationen zum Kriechverhalten der Lotstellen, dass nicht an allen Knotenpunkten der Lotstellen das Kriechverhalten berechnet wird. Dies führte zu verfälschten Ergebnissen. Es wurde festgestellt, dass bei Code-Aster die Wahl der Streckgrenze zur Betrachtung des Materialverhaltens von Bedeutung ist. Wird die Streckgrenze größer Null gewählt, wird innerhalb des Programms angenommen, dass es sich um ein elastisches Materialverhalten handelt. Bei der Wahl der Streckgrenze gleich Null wird ein plastisches Materialverhalten angenommen und das Kriechverhalten an jedem Knotenpunkt der Lotstellen berechnet. Dann kommt es auch nicht mehr zu verfälschten Ergebnissen.

Insgesamt kann man sagen, dass sich das Simulationsprogramm Code-Aster sehr gut für Simulationen eignet. Code-Aster weist umfangreiche Testsimulationen für die unterschiedlichsten Themengebiete auf. Es ist dennoch notwendig eigene Simulationen mithilfe von Messungen zu verifizieren. Des Weiteren bietet Code-Aster eine gute Möglichkeit sich in das Thema Simulation einzuarbeiten und die Vorgehensweise von Simulationen zu verstehen. Aufgrund dieser Arbeit kann Code-Aster als Simulationsprogramm empfohlen werden.

4.2. Kriechverhalten für die Simulation

In Abbildung 74 ist ein Vergleich aller Kriechraten aus 3.3. dargestellt. Die Kriechraten wurden jeweils für die gleiche Lotlegierung SAC 387 bestimmt. Dargestellt ist der relevante Spannungsbereich von 40 bis 100 MPa.

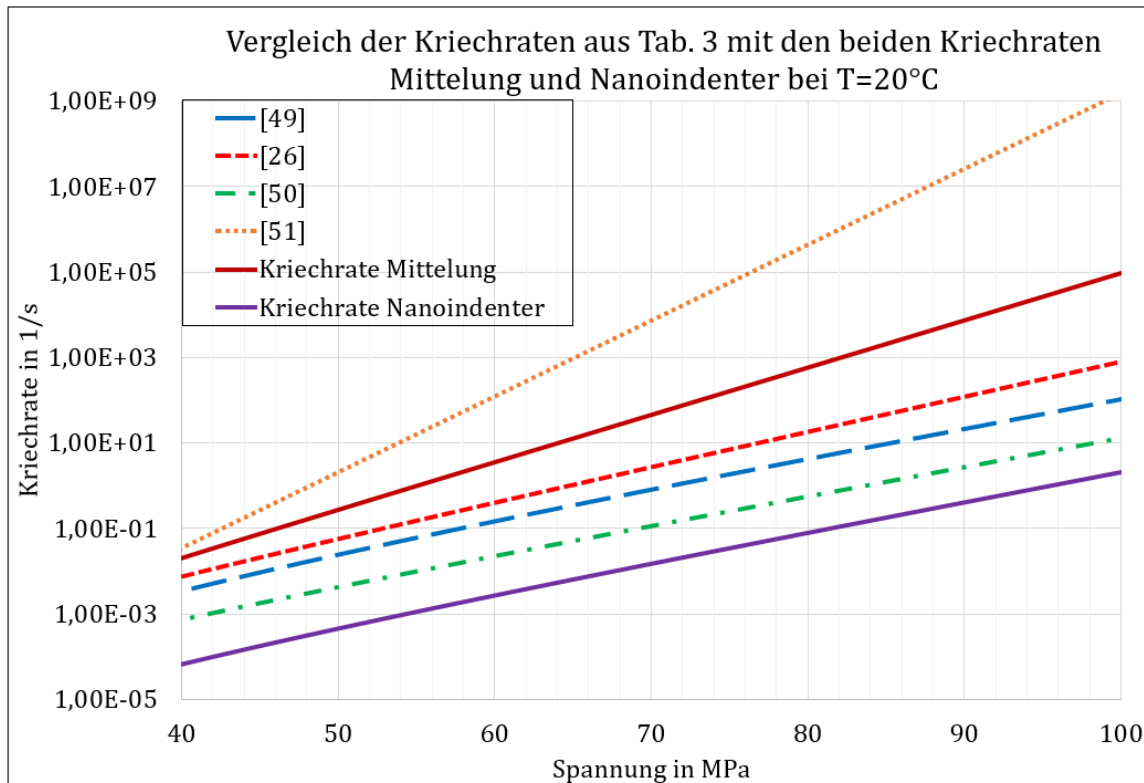


Abbildung 74: Vergleich aller Kriechraten aus 3.4. [29], [51] – [53]

Die Kriechraten wurden jeweils für die gleiche Lotlegierung (SAC 387) bestimmt. Sie unterscheiden sich stark um mehrere Größenordnungen.

In Abbildung 74 ist zu erkennen, dass die Kriechraten stark voneinander abweichen. Dass es zu Abweichungen kommt, kann vor allem bei den veröffentlichten Kriechraten aus [29], [51] – [53] an verschiedenen Faktoren liegen:

- Die unterschiedliche Vorbehandlung der Dogbone-Struktur könnte ein Faktor sein. Es ist bekannt, dass sich das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von SAC Loten auch bei Raumtemperatur ändert. [64]
- Aus [29], [51] – [53] geht nicht hervor, wie die Messumgebung bezüglich der Umgebungstemperatur war
- Die genaue Probengröße und Probengeometrie sind in [29], [51] – [53] nicht dargelegt

- Die Verfahren zum mathematischen Fit der Kriechrate in [29], [51] – [53] können unterschiedlich sein bzw. zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Aus den veröffentlichten Kriechraten geht nicht aus jeder Quelle hervor, wie der Versuchsaufbau ist, wie die Proben vorbehandelt sind oder mit welchen mathematischen Methoden der Fit an die Kriechrate durchgeführt worden ist.

Da der Messaufbau und die Fit-Methode aus den Veröffentlichungen zur Kriechrate nicht genauestens hervorgehen, wurde entschieden aus den veröffentlichten Kriechraten eine mittlere Kriechrate zu bestimmen. Dafür wurden die Koeffizienten der Kriechraten aus [29], [51] – [53] nach dem Garofalo-Modell gemittelt. Mit dieser Mittelung sollte erreicht werden, dass die unterschiedlichen Kriechraten gleich bewertet werden. Um zu überprüfen, ob diese gemittelte Kriechrate das thermische Verhalten der MEMS-Mikrofone widerspiegelt, wurden Simulationen mit dieser Kriechrate durchgeführt. Anschließend wurden die Simulationen mit Messungen verglichen. Dabei zeigten die Simulationen allerdings noch zu große Abweichungen zu den experimentellen Daten. Um zu überprüfen, ob die über die Mittelung bestimmte Kriechrate ausreichend gut mit der Kriechrate der Lotstellen übereinstimmt, wurde die Kriechrate mithilfe eines Nanoindenters direkt an den Lotstellen der Mikrofone gemessen. Bei [29], [51] – [53] wurden die jeweiligen Kriechraten an extra für den Zeitstandversuch hergestellten Dogbone-Strukturen durchgeführt. Es geht allerdings aus [29], [51] – [53] nicht immer hervor, wie genau die Dogbone-Strukturen behandelt worden sind. Allerdings ist davon auszugehen, dass sie nicht die gleiche Behandlung bekamen, wie die späteren Sensoren, die mit der Lotlegierung SAC 387 aufgebaut werden. Bei der Bestimmung der Kriechrate mithilfe des Nanoindenters werden die fertig montierten Mikrofone lediglich durch das Eingießen in Epoxidharz behandelt, um anschließend die Messungen an den Lotstellen durchführen zu können. Des Weiteren ist auch die Größe der Probe relevant. Bei der Dogbone-Struktur handelt es sich im Gegensatz zur untersuchten Lotkugel ($h = 90 \mu\text{m}$ und $d = 90 \mu\text{m}$) um eine makroskopische Probe. So wurde bspw. in [65] gezeigt, dass die Größe der Probe für die Bestimmung der Kriechrate derselben Lotlegierung eine wesentliche Rolle spielt. Bei der Kriechrate, die im Rahmen dieser Arbeit mit dem Nanoindenter (Kriechrate Nanoindenter) bestimmt wurde, zeigte sich ein um ca. vier Größenordnungen langsames Kriechen als bei der aus der Mittelung bestimmten Kriechrate (Kriechrate Mittelung).

Der Vergleich zwischen Simulationen mit den beiden Kriechraten Kriechrate Mittelung und Kriechrate Nanoindenter mit experimentellen Daten zeigte eindeutig, dass sich die Kriechrate Nanoindenter für die Simulationen der Temperaturhysterese des Mikrofonen gut eignet. Im zeitlichen Verlauf haben die Simulationen mit der Kriechrate Nanoindenter und die experimentellen Daten eine gute Übereinstimmung. Die über die Simulation bestimmte Temperaturhysterese und die experimentell bestimmte Temperaturhysterese der Mikrofone zeigen einen ähnlichen Verlauf. Zum einen können die Abweichungen daran liegen, dass beim Vergleich der Mittelwert der Kriechrate Nanoindenter für die Simulation verwendet wurde und zum anderen, dass für den Vergleich die mittleren Werte der Messungen betrachtet werden. Die mithilfe der Simulation bestimmte Temperaturhysterese liegt im Bereich der Standardabweichung der experimentell bestimmten Temperaturhysterese. Dies zeigt, dass die Kriechrate Nanoindenter für thermomechanische Simulationen für die Lotlegierung SAC 387 und der MEMS-Mikrofone verwendet werden kann. Allerdings hat die Bestimmung der Kriechrate mithilfe des Nanoindenters auch gezeigt, dass es notwendig ist die Kriechrate für die jeweiligen Sensoren im besten Fall neu zu bestimmen. Würde man die Mikrofone mit einer anderen Lotlegierung bestücken wollen, sollte für diese Lotlegierung erneut die Kriechrate mithilfe des Nanoindenters bestimmt werden.

4.3. Simulation der Temperaturhysterese

Die Ergebnisse aus 3.6. haben gezeigt, dass sich die momentan verfügbaren Mikrofone trotz der Empfindlichkeitsabweichung nach einem Tempervorgang insgesamt gut verhalten. Die Abweichung von ca. 1 dBV/Pa wurde zwar nach Abbildung 67 überschritten, allerdings wurden die Mikrofone bei einer hohen Temperatur ($T = 120\text{ °C}$) für eine lange Zeitdauer ($t = 24\text{ h}_{\text{Stunde}}$) getempert. Im verbauten Zustand in der Unterhaltungselektronik ist eine so hohe und lange Temperung eher unwahrscheinlich. Abbildung 66 zeigt, dass bei einer kurzen Temperung ($t = 1\text{ h}_{\text{Stunde}}$) bei einer hohen Temperatur ($T = 90\text{ °C}$) ein zufriedenstellendes Ergebnis für diese Mikrofone erreicht wird.

4.4. Simulation von unterschiedlichen Lotparametern

In Kapitel 3.6. wurde gezeigt, dass die Lothöhe eine entscheidende Rolle spielt. Mit der Zunahme der Höhe der Lotstellen ist die Empfindlichkeitsabweichung vom Anfangswert geringer nach einem Tempervorgang. Des Weiteren geht die Empfindlichkeit bei den Mikrofonen mit den höheren Lotstellen nach den Simulationen schneller wieder in Richtung des Anfangswertes zurück. Die höhere Lotmenge bewirkt, dass die Membran weniger gestaucht wird, was dazu führt, dass die Empfindlichkeit weniger vom Anfangswert abweicht.

Die Mikrofone müssten demnach in Zukunft größer konzipiert werden, damit diese eine geringere Temperaturhysterese aufweisen. Allerdings geht der Trend in der Entwicklung dazu, dass die Mikrofone kleiner werden.

In Kapitel 3.7. wurde gezeigt, dass die Wölbung der Lotstellen keinen relevanten Einfluss auf den Verlauf der Empfindlichkeitsabweichung hat. Der Verlauf ist trotz unterschiedlicher Anzahl der konkaven Lotstellen ähnlich. Es kommt dabei nur zu kleinen Abweichungen. Dies kann aber die kleinen Abweichungen der unterschiedlichen Mikrofone bei den Messungen erklären.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Temperaturhysterese von MEMS-Mikrofonen sowohl messtechnisch als auch simulativ untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die Temperaturhysterese bei Flip-Chip MEMS-Mikrofonen stark vom Kriechverhalten der Lotstellen beeinflusst ist. Für die Anwendung dieser Mikrofone in der Unterhaltungselektronik liegt das Ausmaß der Temperaturhysterese noch sehr gut im geforderten Bereich von unter 1 dBV/Pa.

Für die Simulationen wurde das Open-Source-Softwareprogramm Code-Aster verwendet. Dabei sollte auch überprüft werden, wie praktikabel dieses Programm ist und ob es sich für Simulationen der Temperaturhysterese eignet. Es hat sich herausgestellt, dass die Benutzung von Code-Aster bei komplizierten Berechnungen sehr zeitaufwendig ist. Einfache mechanische Fragestellungen können nach einer kurzen Einarbeitungszeit schnell und effektiv gelöst werden. Bei komplizierteren Fragestellungen kann es durch das vorherige Berechnen von Teilsimulationen und eventuelle Fehlersuche sehr zeitintensiv sein die komplette aussagekräftige Simulation durchzuführen. Wurde die Simulation allerdings einmal korrekt aufgestellt, kann diese auf andere Modelle übertragen werden. Die hier vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass sich die Open-Source-Software gut für die Simulationen und auch für weitere Forschungstätigkeiten eignet

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass für die Bestimmung der Kriechrate des verwendeten Lots eigene Untersuchungen durchgeführt werden sollten. So ergab sich bei der Bestimmung der Kriechrate für die Lotlegierung SAC 387 eine deutlich geringere Kriechrate als in bereits veröffentlichter Literatur. Die bereits veröffentlichten Kriechraten aus [29], [51] – [53] wurden im Gegensatz zu den Messungen in dieser Arbeit, die direkt an den Lotstellen durchgeführt worden sind, an makroskopischen Dogbone-Strukturen durchgeführt.

Es konnte mithilfe der Simulationen gezeigt werden, dass die Höhe der Lotstellen einen wesentlichen Einfluss auf die Empfindlichkeitsänderung nach einem Temperprozess hat. Mit Zunahme der Höhe der Lotstellen nimmt die Temperaturhysterese ab.

Mithilfe der Simulationen ist es außerdem möglich zu untersuchen, wie sich Veränderungen der Geometrie auf die Empfindlichkeitsänderung nach einem Temperprozess auswirken würden. So konnte simulativ berechnet werden, dass unterschiedliche Ausprägungen der Lotstellen in konvexer bzw. konkaver Form keinen relevanten Einfluss auf die Empfindlichkeitsänderung haben.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit ist es möglich weitere Simulationen mit der Software Code-Aster durchzuführen. Insbesondere Geometrieänderungen an der Mikrofongeometrie oder auch Lotgeometrie können vorgenommen werden. So könnte zum Beispiel überprüft werden, wie sich niedrige und im Durchmesser große Lotkugeln auf die Temperaturhysterese auswirken. Weitere Möglichkeiten wären zum Beispiel Veränderungen der Membrangeometrie in Durchmesser oder der Membrandicke. Je nach Zielsetzung ließen sich so simulativ Mikrofone entwickeln, die bestimmten Extrembedingungen, wie großer andauernder Hitze bestmöglich standhalten könnten, ohne überdimensioniert sein zu müssen.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Walser, G. Feiertag, M. Loibl, W. Pahl, M. Winter, C. Siegel, A. Leidl: *MEMS-Mikrofone mit hohem Signal zu Rausch Abstand und geringen Sensitivitätsstreuungen*; in Tagungsband Mikrosystemtechnik Kongress 2015; Karlsruhe, Deutschland; 2015; ISBN: 978-3-959-08011-8
- [2] Z.-H. Fu, F. Fan, J.-D. Huang: *Dual-microphone noise reduction for mobile phone application*; in Acoustic, Speech and Signal Processing Conference; Vancouver, Canada; 2013; DOI: 10.1109/ICASSP.2013.6639068
- [3] H. Ebbinghaus, A P. Chew, G. Feiertag, S. Walser: *Messung und Berechnung der Temperaturhysterese von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen*, in Tagungsband Mikrosystemtechnik 2017; München, Deutschland; 2017; ISBN: 978-3-8007-4491-6
- [4] P.R. Scheeper, A.G.H. van der Donk, W. Olthuis, P. Bergveld: *A review of silicon microphones*; Journal of Sensors and Actuators A Vol. 44; 1994; DOI: 10.1016/0924-4247(94)00790-X
- [5] T. Reutter: *Charakterisierung und Optimierung piezoelektrischer MEMS-Mikrophone mittels physikalischer Modellierung und Simulation*; Dissertation; TU München; München, Deutschland; 2014; ISBN: 978-3-8440-3490-5
- [6] G. Bore, S. Peus: *Mikrophone Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele*; Georg Neumann GmbH; Berlin, Deutschland; 1999
- [7] D.T. Martin: *Design, fabrication, and characterisation of a MEMS dual backplate capacitive microphone*; Dissertation; University of Florida; Florida, USA; 2007
- [8] S. Walser: *Programmierbare kapazitive MEMS-Mikrofone*; Dissertation; Universität der Bundeswehr; München, Deutschland; 2018
- [9] M. Winter: *Integration kapazitiver Silizium-Mikrofone in ein Chip Scale Package*; Dissertation; Universität des Saarlandes; Saarbrücken, Deutschland; 2011
- [10] P. Rombach, M. Müllenborn, U. Klein, K. Rasmussen: *The First Low Voltag, Low Noise Differential Silicon Microphone, Technology Development and*

- Measurement Results; Sensors and Actuators A Vol. 95; 2001; DOI: 10.1109/MEMSYS.2001.906474*
- [11] S. Walser, C. Siegel, M. Winter, M. Loibl, W. Pahl, A. Leidl, G. Feiertag: *Flip-Chip MEMS Microphone Package With Small Front-Volume and Large Back-Volume*; 20th European Microelectronics Packaging Conference (EMPC); Friedrichshafen, Deutschland; 2015; ISBN: 978-0-9568-0862-2
- [12] B.H. Kim, H.S. Lee: *Acoustical-Thermal Noise in a Capacitive MEMS Microphone*; IEEE Sensors Journal Vol. 15 Nr. 12; 2015; DOI: 10.1109/JSEN.2015.2464372
- [13] M. Ozdogan, S. Towfighian: *A MEMS Microphone using repulsive force sensors*; ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference; Charlotte, USA 2016; DOI: 10.1115/DETC2016-60171
- [14] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Halliday Physik*, WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA; Weinheim, Deutschland; 2009; ISBN: 978-3-527-41356-0
- [15] Wikimedia Foundation Inc. (Hrsg.): *Interferenz (Physik)*; aufgerufen am 15.12.2020: [https://de.wikipedia.org/wiki/Interferenz_\(Physik\)#/media/Da:te:Interferenz_sinus.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Interferenz_(Physik)#/media/Da:te:Interferenz_sinus.svg)
- [16] T. Görne: *Tontechnik*; Carl Hanser Verlag; München, Deutschland; 2015; ISBN: 978-3-446-42395-4
- [17] C. Philipp: *Analyse temperaturbedingter Relaxationsprozesse bei MEMS-Mikrofonen*, Masterarbeit; HS München; München, Deutschland; 2016
- [18] S. Liu, Y. Liu: *Modeling and Simulation for Microelectronic Packaging Assembly*, John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd. Chemical Industry Press; Singapore, Australia; 2011; ISBN: 978-0-470-82780-2
- [19] S. Wiese: *Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik*, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2010; ISBN: 978-3-642-05463-1
- [20] D. Meschede: *Gerthsen Physik*, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2001; ISBN: 978-3-662-45977-5

- [21] T. Görne: *Mikrofone in Theorie und Praxis*, Elektor-Verlag GmbH; Aachen, Deutschland; 2007; ISBN: 978-3-895-76189-8
- [22] H. Q. Yang, J. West, R. E. Harris: *Coupled Fluid–Structure Interaction Analysis of Solid Rocket Motor with Flexible Inhibitors*, Journal of Spacecraft and Rockets; 2017; DOI: 10.2514/1.A33947
- [23] S. Timoshenko: *Theory of Plates and Shells*, McGraw Hill Book Company; New York, USA; 1959; ISBN: 978-0-070-70125-0
- [24] E. Macherauch, H.-W. Zoch: *Praktikum in Werkstoffkunde*, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2011; ISBN: 978-3-658-25374-5
- [25] E. Roos, K. Maile. M. Seidenfuß: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2017; ISBN: 978-3-662-49531-5
- [26] J. Rösler, H. Haders, M. Bäker: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*; Springer Vieweg; Wiesbaden, Deutschland; 2019; ISBN: 978-3-8348-2241-3
- [27] Q. Wang: *Mechanical properties and microstructure investigation of Sn-Ag-Cu lead free solder for electronic package applications*; Dissertation; Auburn University; Auburn, USA; 2005
- [28] O. Volkova: *Praktikum Grundlagen der Werkstoffwissenschaft Teil 7: Kriechen*; aufgerufen am 15.12.2020: http://www.wv.tu-freiberg.de/mk/Dokumente/P-Kriechen/beam_creep.pdf
- [29] J. H. L. Pang, B. Xiong und T. H. Low: *Creep and Fatigue Characterization of Lead Free 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu Solder*, Electronic Components and Technology Conference 2004; Las Vegas, USA; 2004; DOI: 10.1109/ECTC.2004.1320285
- [30] DIN EN ISO 899-1 (2018-03): *Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens – Teil 1: Zeitstand-Zugversuch*; DOI: 10.31030/2799421
- [31] F. Garofalo: *Fundamentals of creep and creep-rupture in metals*; University of California; California, USA; 1965; ISBN: 978-0-08-099427-7
- [32] EDF SA (Hrsg.): *Code_Aster Presentation*; aufgerufen am 15.12.2020: <https://www.code-aster.org/spip.php?rubrique18>

- [33] K.-J. Bathe: *Finite-Elemente-Methode*, Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2002; ISBN: 978-3-540-15602-4
- [34] P. Steinke: *Finite-Elemente-Methode*, Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, Deutschland; 2015; ISBN: 978-3-642-53937-4
- [35] F. Rieg, R. Hackenschmidt: *Finite Elemente Analyse für Ingenieure*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, Deutschland, Österreich; 2009; ISBN: 978-3-446-44283-2
- [36] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Hrsg.): Die gesetzlichen Einheiten in Deutschland; aufgerufen am 15.12.2020: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/broschueren/intern_einheitensystem/Die_gesetzlichen_Einheiten.pdf
- [37] Archytas AG (Hrsg.): Konsistente Einheitensysteme; aufgerufen am 15.12.2020: https://www.archytas.ch/wp-content/uploads/2016/07/archytas_einheiten_2016.pdf
- [38] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, D. D. Fox: *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, Elsevier Ltd.; Amsterdam, Niederlande; 2014; ISBN: 978-1-85617-634-7
- [39] Dassault Systèmes (Hrsg.): *Grundlagen der Vernetzung*; aufgerufen am 15.12.2020: http://help.solidworks.com/2012/German/SolidWorks/cworks/step5_mesh_the_part.html
- [40] Schröder S.: *Verifikation und Validierung im wissenschaftlichen Rechnen*; aufgerufen am 15.12.2020: https://hps.vi4io.org/_media/teaching/wintersemester_2012_2013/ms-1213-schroeder-sandra-verifikationundvalidierungim-wissenschaftlichenrechen-praesentation.pdf
- [41] Autodesk, Inc. (Hrsg.): *How to Perform a Mesh Convergence Study*; aufgerufen am 15.12.2020: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html>
- [42] Geuzaine C., Remacle J.-F.: *Gmsh – A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*; aufgerufen am 15.12.2020: <https://gmsh.info/>

- [43] H. Föll: *Elastizitätsmodul in Zahlen*; aufgerufen am 15.12.2020: https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_7/illustr/t7_1_2.html
- [44] MEMS and Nanotechnology Clearinghouse (Hrsg.): *Material: Polysilicon, film*; aufgerufen am 15.12.2020: <https://www.memsnet.org/material/polysiliconfilm/>
- [45] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft (Hrsg.): *Poisson-Verhältnis*; aufgerufen am 15.12.2020: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/poisson-verhaeltnis/12464>
- [46] C.-C. Röhlig: *Evaluierung elastischer Eigenschaften von Mikro- und Nanostrukturen*, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Freiburg im Breisgau, Deutschland; 2011
- [47] DIN EN 60268-4; 2012: *Elektroakustische Geräte - Teil 4: Mikrofone*; DOI: 10.31030/3052777
- [48] G. Vogt: *Effizienter, flexibler und genauer Entwurf von Mehrlagen-Mikrowellenschaltungen mittels modularer Techniken*; Dissertation; TU Ilmenau; Ilmenau, Deutschland; 2016
- [49] J. Stark: *Bestimmung der Materialparameter von bleifreien Loten für die Simulation von MEMS Mikrofonen*; Masterarbeit; HS München; München, Deutschland; 2019
- [50] E. Zukowski: *Probabilistische Lebensdauermodelle für thermomechanische Ermüdung von Lötverbindungen in CSP-Bauelementen*; Dissertation; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Freiburg im Breisgau, Deutschland; 2014
- [51] A. Schubert, R. Dudek, E. Auerswald, A. Gollhardt, B. Michel, H. Reichl: *Fatigue Life Models for SnAgCu and Solder Joints Evaluated by Experiments and Simulations*, in 53rd Electronic Components and Technology Conference; New Orleans, USA; 2003; DOI: 10.1109/ECTC.2003.1216343
- [52] J. H. L. Pang, B. S. Xiong: *Mechanical Properties for 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu Lead-Free Solder Alloy*; IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies; vol. 28, 2005; DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848587

- [53] J. Lau, W. Dauksher, P. Vianco: *Acceleration Models, Constitutive Equations, and Reliability of Lead-Free Solders and Joints*, in 53rd Electronic Components and Technology Conference, New Orleans, USA; 2003; DOI: 10.1109/ECTC.2003.1216281
- [54] L. Papula: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden, Deutschland; 2009; ISBN: 978-3-658-21746-4
- [55] Helmut Fischer GmbH: *Betriebsanleitung Picodentor HM500*; Sindelfingen, Deutschland; 2012.
- [56] E. Nordin: *Material characterization by indentation*, Project Work in Contact Mechanics; KTH Royal Institute of Technology; Stockholm, Schweden; 2013
- [57] M. M. J. C. S. B. C. P. Md Hasnine: *Nanomechanical Characterization of Lead Free Solder Joints*; in MEMS and Nanotechnology Volume 5: Proceedings of the 2013 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics; Springer International Publishing; Basel, Schweiz; 2014; ISBN: 978-3-319-00780-9
- [58] D. Tabor: *The hardness of solids*, Surface Physics, Cavendish Laboratory, Cambridge, 2002; DOI: 10.1088/0034-6683/1/3/I01
- [59] D. C. S. S. M. Cabibbo: *Nanoindentation Hardness measurement in piling up*; SciVerse ScienceDirect; Amsterdam, Niederlande; 2014; DOI: 10.1016/j.phpro.2012.12.014
- [60] S. B. N. Moharrami: *A comparison of nanoindentation pile-up in bulk materials and thin films*, Thin Solid Films, Elsevier B. V.; Amsterdam, Niederlande 2014; DOI: 10.1016/j.tsf.2014.06.060
- [61] Neil Salkind: *Encyclopedia of Research Design*; Sage Publications Ltd.; London, Großbritannien; 2010; ISBN: 978-1412961271
- [62] Leibniz Universität Hannover (Hrsg.): *Preisliste für die Bestellung von COMSOL-Lizenzen beim Rechenzentrum*; aufgerufen am 15.12.2020: https://www.luis.uni-hannover.de/fileadmin/software-lizenzen/Ueberlassung/comsol_preisliste_luis.pdf

- [63] ConWeb GmbH (Hrsg.): *ANSYS Discovery Lizenzen*; aufgerufen am 15.12.2020: http://www.conweb.de/ansys-discovery_lizenzen.html
- [64] J. Pang: *Lead-Free Solder*; Springer Science + Business Media S. A.; Luxemburg; 2012; ISBN: 978-0-387-68422-2
- [65] S. Wiese, A. Schubert, H. Walter, R. Dudek, F. Feutsel, E. Meusel und B. Michel, *Constitutive Behaviour of Lead-free Solders vs. Lead-containing Solders - Experiments on Bulk Specimens and Flip-Chip Joints*; Electronic Components and Technology Conference; Florida, USA; 2001; DOI: 10.1109/ECTC.2001.927900

Eigene Veröffentlichungen

- 10/2017 H. Ebbinghaus, A. P. Chew, G. Feiertag, S. Walser; *Messung und Berechnung der Temperaturhysterese von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen*; Tagungsband Mikrosystemtechnik-kongress 2017; München, Deutschland; 2017 ISBN: 978-3-8007-4491-6
- 04/2018 H. Ebbinghaus, G. Feiertag, S. Walser; *Simulation of thermomechanical stress of a MEMS microphone*; 19th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE); Toulouse, Frankreich; 2018 DOI: 10.1109/EuroSimE.2018.8369892
- 06/2018 H. Ebbinghaus, G. Feiertag, S. Walser; *Calculation of the Deformation of a Circular Fixed Silicon Membrane with Prestress with the Help of Finite Element Analysis*; Sensoren und Messsysteme; Nürnberg, Deutschland; 2018 ISBN: 978-3-8007-4683-5
- 06/2019 H. Ebbinghaus, G. Feiertag, S. Walser; *Simulation von thermischen Einflüssen auf MEMS-Mikrofone*; Sensoren und Messsysteme; Nürnberg, Deutschland; 2019 DOI: 10.5162/sensoren2019/P1.21
- 10/2019 H. Ebbinghaus, G. Feiertag, S. Walser; *Bestimmung der Temperaturhysterese von MEMS-Mikrofonen mithilfe der Finiten Elemente Methode*; Mikrosystemtechnikkongress 2019; Berlin, Deutschland; 2019 ISBN: 978-3-8007-5129-7

Anhang A

Textcode für die Modellierung der Siliziummembran

```
//Geometriedaten für Mikrofone mit runder Membran
//alle Daten in mm
rmembran=0.56;
mpunktx=0.53;
mpunkty=0.0;
r0=rmembran;
hgelek=3E-3;
amemgelek=2e-3;
hmembran=5E-4;
cl2=0.05;
cl4=0.005;

//Membran unten
Point(307)={mpunktx,mpunkty,hlot2+hgelek+amemgelek,cl4};
Point(308)={mpunktx+0.560000*cos(0*Pi),mpunkty+0.560000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(309)={mpunktx+0.560000*cos(0.25*Pi),mpunkty+0.560000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(310)={mpunktx+0.560000*cos(0.5*Pi),mpunkty+0.560000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(311)={mpunktx+0.560000*cos(0.75*Pi),mpunkty+0.560000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(312)={mpunktx+0.560000*cos(1*Pi),mpunkty+0.560000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(313)={mpunktx+0.560000*cos(1.25*Pi),mpunkty+0.560000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(314)={mpunktx+0.560000*cos(1.5*Pi),mpunkty+0.560000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(315)={mpunktx+0.560000*cos(1.75*Pi),mpunkty+0.560000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};

Point(316)={mpunktx,mpunkty,hlot2+hgelek+amemgelek,cl4};
Point(317)={mpunktx+0.448000*cos(0*Pi),mpunkty+0.448000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(318)={mpunktx+0.448000*cos(0.25*Pi),mpunkty+0.448000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(319)={mpunktx+0.448000*cos(0.5*Pi),mpunkty+0.448000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(320)={mpunktx+0.448000*cos(0.75*Pi),mpunkty+0.448000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(321)={mpunktx+0.448000*cos(1*Pi),mpunkty+0.448000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(322)={mpunktx+0.448000*cos(1.25*Pi),mpunkty+0.448000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(323)={mpunktx+0.448000*cos(1.5*Pi),mpunkty+0.448000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(324)={mpunktx+0.448000*cos(1.75*Pi),mpunkty+0.448000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};

Point(325)={mpunktx,mpunkty,hlot2+hgelek+amemgelek,cl4};
Point(326)={mpunktx+0.336000*cos(0*Pi),mpunkty+0.336000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(327)={mpunktx+0.336000*cos(0.25*Pi),mpunkty+0.336000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(328)={mpunktx+0.336000*cos(0.5*Pi),mpunkty+0.336000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(329)={mpunktx+0.336000*cos(0.75*Pi),mpunkty+0.336000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(330)={mpunktx+0.336000*cos(1*Pi),mpunkty+0.336000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(331)={mpunktx+0.336000*cos(1.25*Pi),mpunkty+0.336000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(332)={mpunktx+0.336000*cos(1.5*Pi),mpunkty+0.336000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
```

```

Point(333)={mpunkt $x$ +0.336000*cos(1.75*Pi),mpunkt $y$ +0.336000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(334)={mpunkt $x$ ,mpunkt $y$ ,hlot2+hgelek+amemgelek,cl4};
Point(335)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(0*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(336)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(0.25*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(337)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(0.5*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(338)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(0.75*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(339)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(1*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(340)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(1.25*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(341)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(1.5*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(342)={mpunkt $x$ +0.224000*cos(1.75*Pi),mpunkt $y$ +0.224000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};

Point(343)={mpunkt $x$ ,mpunkt $y$ ,hlot2+hgelek+amemgelek,cl4};
Point(344)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(0*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(345)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(0.25*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(346)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(0.5*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(347)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(0.75*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(348)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(1*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(349)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(1.25*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(350)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(1.5*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};
Point(351)={mpunkt $x$ +0.112000*cos(1.75*Pi),mpunkt $y$ +0.112000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek,cl2};

//Membran oben
Point(352)={mpunkt $x$ ,mpunkt $y$ ,hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl4};
Point(353)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(0*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(354)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(0.25*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(355)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(0.5*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(356)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(0.75*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(357)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(1*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(358)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(1.25*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(359)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(1.5*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(360)={mpunkt $x$ +0.560000*cos(1.75*Pi),mpunkt $y$ +0.560000*sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};

Point(361)={mpunkt $x$ ,mpunkt $y$ ,hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl4};
Point(362)={mpunkt $x$ +0.448000*cos(0*Pi),mpunkt $y$ +0.448000*sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
Point(363)={mpunkt $x$ +0.448000*cos(0.25*Pi),mpunkt $y$ +0.448000*sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};

```


Point(386)={mpunkt x +0.224000*Cos(1.5*Pi),mpunkt y +0.224000*Sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(387)={mpunkt x +0.224000*Cos(1.75*Pi),mpunkt y +0.224000*Sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};

 Point(388)={mpunkt x ,mpunkt y ,hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl4};
 Point(389)={mpunkt x +0.112000*Cos(0*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(0*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(390)={mpunkt x +0.112000*Cos(0.25*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(0.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(391)={mpunkt x +0.112000*Cos(0.5*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(0.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(392)={mpunkt x +0.112000*Cos(0.75*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(0.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(393)={mpunkt x +0.112000*Cos(1*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(1*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(394)={mpunkt x +0.112000*Cos(1.25*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(1.25*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(395)={mpunkt x +0.112000*Cos(1.5*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(1.5*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};
 Point(396)={mpunkt x +0.112000*Cos(1.75*Pi),mpunkt y +0.112000*Sin(1.75*Pi),hlot2+hgelek+amemgelek+hmembran,cl2};

 Circle(345)={308,307,309};
 Circle(346)={309,307,310};
 Circle(347)={310,307,311};
 Circle(348)={311,307,312};
 Circle(349)={312,307,313};
 Circle(350)={313,307,314};
 Circle(351)={314,307,315};
 Circle(352)={315,307,308};

 Circle(353)={353,352,354};
 Circle(354)={354,352,355};
 Circle(355)={355,352,356};
 Circle(356)={356,352,357};
 Circle(357)={357,352,358};
 Circle(358)={358,352,359};
 Circle(359)={359,352,360};
 Circle(360)={360,352,353};

 Line(401)={308,353};
 Line(402)={309,354};
 Line(403)={310,355};
 Line(404)={311,356};
 Line(405)={312,357};

Line(406)={313,358};
Line(407)={314,359};
Line(408)={315,360};

//Membran unten

Circle(497)={317,316,318};
Circle(498)={318,316,319};
Circle(499)={319,316,320};
Circle(500)={320,316,321};
Circle(501)={321,316,322};
Circle(502)={322,316,323};
Circle(503)={323,316,324};
Circle(504)={324,316,317};

Circle(505)={326,325,327};
Circle(506)={327,325,328};
Circle(507)={328,325,329};
Circle(508)={329,325,330};
Circle(509)={330,325,331};
Circle(510)={331,325,332};
Circle(511)={332,325,333};
Circle(512)={333,325,326};

Circle(513)={335,334,336};
Circle(514)={336,334,337};
Circle(515)={337,334,338};
Circle(516)={338,334,339};
Circle(517)={339,334,340};
Circle(518)={340,334,341};
Circle(519)={341,334,342};
Circle(520)={342,334,335};

Circle(521)={344,343,345};
Circle(522)={345,343,346};
Circle(523)={346,343,347};
Circle(524)={347,343,348};
Circle(525)={348,343,349};
Circle(526)={349,343,350};
Circle(527)={350,343,351};
Circle(528)={351,343,344};

//Membran oben

Circle(529)={362,361,363};
Circle(530)={363,361,364};
Circle(531)={364,361,365};
Circle(532)={365,361,366};

Circle(533)={366,361,367};
 Circle(534)={367,361,368};
 Circle(535)={368,361,369};
 Circle(536)={369,361,362};

 Circle(537)={371,370,372};
 Circle(538)={372,370,373};
 Circle(539)={373,370,374};
 Circle(540)={374,370,375};
 Circle(541)={375,370,376};
 Circle(542)={376,370,377};
 Circle(543)={377,370,378};
 Circle(544)={378,370,371};

 Circle(545)={380,379,381};
 Circle(546)={381,379,382};
 Circle(547)={382,379,383};
 Circle(548)={383,379,384};
 Circle(549)={384,379,385};
 Circle(550)={385,379,386};
 Circle(551)={386,379,387};
 Circle(552)={387,379,380};

 Circle(553)={389,388,390};
 Circle(554)={390,388,391};
 Circle(555)={391,388,392};
 Circle(556)={392,388,393};
 Circle(557)={393,388,394};
 Circle(558)={394,388,395};
 Circle(559)={395,388,396};
 Circle(560)={396,388,389};

 Line Loop(167)={345,346,347,348,349,350,351,352};
 Line Loop(168)={353,354,355,356,357,358,359,360};
 Line Loop(188)={345,402,-353,-401};
 Line Loop(189)={346,403,-354,-402};
 Line Loop(190)={347,404,-355,-403};
 Line Loop(191)={348,405,-356,-404};
 Line Loop(192)={349,406,-357,-405};
 Line Loop(193)={350,407,-358,-406};
 Line Loop(194)={351,408,-359,-407};
 Line Loop(195)={352,401,-360,-408};

 //Membrane unten
 Line Loop(228)={497:504};
 Line Loop(229)={505:512};

Line Loop(230)={513:520};
 Line Loop(231)={521:528};

//Membrane oben

Line Loop(232)={529:536};
 Line Loop(233)={537:544};
 Line Loop(234)={545:552};
 Line Loop(235)={553:560};

Ruled Surface(181)={188};
 Ruled Surface(182)={189};
 Ruled Surface(183)={190};
 Ruled Surface(184)={191};
 Ruled Surface(185)={192};
 Ruled Surface(186)={193};
 Ruled Surface(187)={194};
 Ruled Surface(188)={195};

//Membrane unten

Plane Surface(223)={167,228};
 Plane Surface(224)={228,229};
 Plane Surface(225)={229,230};
 Plane Surface(226)={230,231};
 Plane Surface(227)={231};

//Membrane oben

Plane Surface(228)={168,232};
 Plane Surface(229)={232,233};
 Plane Surface(230)={233,234};
 Plane Surface(231)={234,235};
 Plane Surface(232)={235};

//Membrane

Surface Loop(8)={181:188,223:232};

//Membrane

Volume(8)={8};

//Membrane

Physical Surface("Druck")={223:227};
 Physical Volume("Membran")={8};
 Physical Surface("Fixed")={181:188};

Anhang B

Textcode für eine Berechnungsdatei

```

DEBUT();

MA=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=163000.0,
    NU=0.224,));

MAIL=LIRE_MALLAGE(FORMAT='MED');

MAIL=MODI_MALLAGE(reuse =MAIL,
    MAILLAGE=MAIL,
    ORIE_PEAU_3D=_F(GROUP_MA='Druck',));

MODE=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MAIL,
    AFFE=( _F(GROUP_MA='Membran',
        PHENOMENE='MECANIQUE',
        MODELISATION='3D'),
        _F(TOUT='OUI',
            PHENOMENE='MECANIQUE',
            MODELISATION='3D',)),);

sig=CREA_CHAMP(TYPE_CHAM='ELGA_SIEF_R',
    PROL_ZERO='OUI',
    OPERATION='AFFE',
    MODELE=MODE,
    AFFE=(
        _F(GROUP_MA='Membran',
            NOM_CMP='SIXX',
            VALE=50),
        _F(GROUP_MA='Membran',
            NOM_CMP='SIYY',
            VALE=50,)),);

l1=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=0.0,
    INTERVALLE=_F(JUSQU_A=5.0,
        PAS=1.0,));

l2=DEFI_LIST_REEL(DEBUT=5.0,
    INTERVALLE=_F(JUSQU_A=10.0,
        PAS=1.0,));

MATE=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=MAIL,

```

```

AFFE=_F(TOUT='OUI',
        MATER=MA,));

BC1=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODE,
                   DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='Fixed',
                                DX=0.0,
                                DY=0.0,
                                DZ=0.0,));

BC2=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODE,
                   DDL_IMPO=_F(GROUP_MA='Fixed',
                                DX=0.0,
                                DY=0.0,
                                DZ=0.0,)),
    PRES_REP=_F(GROUP_MA='Druck',
                PRES=1e-06,));

PreSigm=STAT_NON_LINE(MODELE=MODE,
                      CHAM_MATER=MATE,
                      EXCIT=_F(CHARGE=BC1),
                      COMPORTEMENT=_F(RELATION='ELAS'),
                      ETAT_INIT=_F(SIGM=sig),
                      INCREMENT=_F(LIST_INST=11,));

RESU=STAT_NON_LINE(MODELE=MODE,
                   CHAM_MATER=MATE,
                   EXCIT=_F(CHARGE=BC2),
                   COMPORTEMENT=_F(RELATION='ELAS',
                                    DEFORMATION='GROT_GDEP'),
                   ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=PreSigm),
                   INCREMENT=_F(LIST_INST=12),
                   RECH_LINEAIRE=_F(METHODE='CORDE',));

RESU=CALC_CHAMP(reuse =RESU,
                RESULTAT=RESU,
                CONTRAINTE=('SIGM_NOEU','SIGM_ELNO',));

IMPR_RESU(FORMAT='MED',
          UNITE=80,
          RESU=_F(MAILLAGE=MAIL,
                 RESULTAT=RESU,
                 NOM_CHAM=('DEPL','SIGM_NOEU','SIGM_ELNO','SIEQ_NOEU',)),);

FIN();

```

#CHECKSUM:a12fc190d15cea0e26ab60da323a127f -:FIN CHECKSUM

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts SimuSens an der Hochschule München. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Der Projektträger war die VDI Technologiezentrum GmbH.

Mein besonderer Dank gilt dem Projektinitiator und meinem Betreuer Prof. Dr. Gregor Feiertag. Für die vielen und hilfreichen Diskussionen möchte ich mich herzlichst bedanken.

Ein ebenso herzlicher Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Walter Hansch für die Übernahme und Betreuung der Dissertation und dem dieser Arbeit entgegen gebrachtem Interesse.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dr. Sebastian Walser von der Firma TDK AG für die gute Zusammenarbeit danken.

Ebenfalls möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Labors für Aufbau- und Verbindungstechnik an der Hochschule München bedanken. Ein weiterer Dank gilt Herrn Stark und Herrn Brand, die im Rahmen ihrer Masterarbeit, zu meinem Thema wertvolle Beiträge geliefert haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für deren Unterstützung und Motivation bedanken.