

# **Zuverlässigkeit von Mikrobolometer-Infrarotsensoren**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Abteilung Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaft

genehmigte Dissertation

von

Michael Elßner

aus

Leipzig

Gutachter: Prof. Dr. Holger Vogt  
Gutachter: Prof. Michael Kraft Ph.D.  
Tag der mündlichen Prüfung: 15.01.2016

# Zusammenfassung

Die Lebensdauer, Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit von mikroelektronischen Systemen ist ein Thema das immer wichtiger wird gerade dann, wenn Produkte immer kleiner und komplexer werden.

Diese Arbeit bietet erstmalig eine umfassende und wissenschaftlich fundierte Analyse der Zuverlässigkeit für Infrarotsensoren basierend auf Mikrobolometern. Die Untersuchungen fokussieren sich auf die für Infrarotsensoren spezifische Themen, wie die mechanische Stabilität des hermetischen Chip-Scale-Package, die Zuverlässigkeit der Bolometerpixel und die Langzeitstabilität der Sensorperformance.

Die Zuverlässigkeit wurde sowohl theoretisch als auch praktisch untersucht. Dafür wurden die Sensoren mit Prüfverfahren beschleunigt gealtert und die Fehlermechanismen untersucht. Dabei zeigte sich der Sensor sehr robust gegenüber Umweltbelastungen.

Das Package bildete auf Grund der wirkenden thermo-mechanischen Kräfte kleinere Risse und Poren, die die Festigkeit leicht reduzierten, verlor aber nicht seine Dichtigkeit. Ebenso zeigten die Bolometerpixel keine Fehler auf. Die Zuverlässigkeit und mechanische Stabilität konnten mit Simulationen weiter untersucht und bestätigt werden.

Untersuchungen der Sensorperformance zeigten eine Degradation über die Lebensdauer auf. Eine Analyse der physikalischen Hintergründe zeigte, dass neben einer geringfügigen Reduktion des Temperaturkoeffizienten, Ausgasprozesse innerhalb des Packages zu einer Erhöhung des Innendrucks, folglich zu einer Reduktion der thermischen Isolation und damit zur Verringerung der Sensorperformance führen.

Abschließend wurde auf Grund der hier ermittelten Fehlermechanismen ein innovatives Prüfsystem entwickelt, mit dem die Zuverlässigkeit von Infrarotsensoren bestimmt werden kann. Mit einem schnellen Selbsttest ist es somit möglich, die Sensorperformance für jedes einzelne Pixel und alle relevanten Fehlermechanismen zu überwachen.

# Abstract

The lifetime, long-term stability and reliability of microelectronic systems are issues that are becoming more and more important, especially when products are getting smaller and more complex.

This work provides the first scientific analysis of the reliability of infrared sensors based on microbolometers. The investigations focus on the specific issues of infrared sensors, such as the mechanical stability of the hermetic chip-scale package, the reliability of the bolometer pixel and long-term stability of the sensor performance.

The reliability was examined both theoretically and experimentally. For this purpose, the sensors were aged accelerated with special test procedures and the relevant failure mechanisms were studied. Here, the sensor was shown to be very robust against environmental stresses.

The package formed smaller cracks and voids due to the thermo-mechanical forces, that slightly reduced the mechanical strength, but the package did not lose its hermeticity. Likewise the bolometer pixel showed no failures. The reliability and mechanical stability were further investigated and reassured with simulations.

Investigations of the sensor performance showed an intense reduction over the lifetime. An analysis of the physical background showed besides a slight reduction of the temperature coefficient, that outgassing within the package increased the internal pressure which in turn reduced the thermal insulation and consequently reduced the sensor performance.

Finally, an innovative reliability testing system based on the determined failure mechanisms of infrared sensors is developed. With a quick self-test, it is possible to monitor the performance for each pixel and all relevant failure mechanisms.

---

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	XI
Abkürzungsverzeichnis .....	XIII
Formelzeichen .....	XIV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Ziele der Zuverlässigkeit.....	3
2.2 Definition und Parameter der Zuverlässigkeit.....	4
2.3 Theorie der beschleunigten Alterung.....	8
2.4 Methodischer Ansatz zur Bestimmung der Zuverlässigkeit.....	9
2.5 Vorstellung des Infrarotsensors .....	12
<b>3 Stand der Technik.....</b>	<b>15</b>
<b>4 Fehlermechanismen im Infrarotsensor .....</b>	<b>22</b>
4.1 Modularisierung des Infrarotsensors.....	22
4.2 Bolometer.....	28
4.2.1 Elektromigration .....	31
4.2.2 Rauschen .....	33
4.2.3 TCR.....	37
4.3 Package.....	39
4.3.1 Aufbau des Chip-Scale-Package .....	41
4.3.2 Modellierung der thermischen Isolation .....	44
4.3.3 Vakuumlebensdauer .....	49
4.3.4 Mechanische Fehlermechanismen .....	61
4.4 Applikationsprofile.....	65
4.5 Zuverlässigkeitsprüfverfahren .....	67
<b>5 Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen.....</b>	<b>77</b>
5.1 Degradation der Sensorperformance .....	77

---

5.1.1	Rauschen .....	79
5.1.2	Deckeltransmission .....	83
5.1.3	TCR.....	86
5.1.4	Thermische Isolation.....	91
5.1.5	Modellierung der Performancedegradation .....	95
5.1.6	Optimierung der Vakuumlebensdauer .....	100
5.2	Lebensdauermodell.....	102
5.3	Strombelastungsprüfung.....	103
5.4	Prüfung des Package .....	106
5.4.1	Coffin-Manson Modell .....	107
5.4.2	Prüfung der Festigkeit.....	109
5.4.3	Untersuchung des Lötrahmens.....	110
5.4.4	FEM-Simulationen des CSPs .....	114
5.5	Mechanische Stabilität der Bolometer .....	119
<b>6</b>	<b>Entwicklung eines Zuverlässigkeitsprüfsystems.....</b>	<b>127</b>
6.1	Prüfkriterien .....	127
6.2	Grundlagen der Vakuummessung.....	130
6.3	Messprinzip des Bolometer-Vakuumsensors.....	131
6.4	Experimentelle und simulative Ergebnisse.....	135
6.5	Überwachung der Bolometerpixel.....	142
6.6	Praktische Implementierung .....	145
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>150</b>
	Literaturverzeichnis .....	153

---

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Fehlerrate im Form einer Badewannenkurve [6]..6	
Abbildung 2: Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit .....	10
Abbildung 3: Beispielbilder für Infrarotaufnahmen ohne zusätzliche Bildverarbeitung vom Fraunhofer IMS, links aktive Elektronik und rechts Straßenbild in Graustufen.....	12
Abbildung 4: Sensorprinzip Bolometer [13].....	13
Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Infrarotsensors .....	14
Abbildung 6: Fraunhofer IMS CSP auf Platine aufgebaut .....	14
Abbildung 7: Ausfallursachen klassischer ICs [40] .....	23
Abbildung 8: Verbiegung eines mit Epotek H20E aufgeklebten Si-Chips –ca. 7 µm von Chip-Mitte bis zum Rand, oben: Messbild des optischen Profilers ISIS, unten: Messwerte Linie durch die Chipmitte.....	25
Abbildung 9: Zugfestigkeit von Palladium- und Gold-Drahtbonds für Hochtemperaturanwendungen bei einer Auslagerung bei 250 °C [13].....	26
Abbildung 10: Bolometer auf der ROIC Schaltung im Querschnitt [12].....	27
Abbildung 11: SEM Aufnahme eines Bolometer-Array von oben (links) und seitlich (rechts) [12].....	29
Abbildung 12: beispielhafte Elektromigrationsschäden an Leitbahnen nach [50], links: Aluminium Leitbahnen, rechts: Querschnitt einer Via- Verbindung .....	32
Abbildung 13: Strukturkonfiguration von Wasserstoff in amorphem Silizium [60] .....	38
Abbildung 14: Foto QVGA-CSP im Vergleich mit einer 1 Cent Münze .....	40
Abbildung 15: Fraunhofer IMS IRFPA im Keramik-Package .....	40
Abbildung 16: CSP-Prozess auf Wafer-Level.....	41
Abbildung 17: SLID Verfahren am Beispiel einer Cu/Sn Verbindung [13].....	43

---

Abbildung 18: CSP im Querschnitt (oben) und vergrößerter Ausschnitt der Lötverbindung (unten) [13] .....	43
Abbildung 19: Skizze der drei Arten von thermischen Leitfähigkeiten für Bolometer .....	44
Abbildung 20: Funktion der thermischen Leitfähigkeit der Gase über den Innenruck des Package .....	48
Abbildung 21: Vereinfachtes Beschreibungsmodell der molekularen Wärmeübertragung.....	49
Abbildung 22: Gasdruck durch Moleküle, die mit der inneren Wand des Packages zusammenstoßen, Kräfte sind in Rot dargestellt, der Druck resultiert aus der Summe der Kollisionskräfte [82] auf die Innenwand des Package .....	50
Abbildung 23: Fehlermechanismen die zur Steigerung des Innendrucks im Package führen können .....	51
Abbildung 24: Restgasanalyse von CVD Siliziumdioxid nach [87] .....	56
Abbildung 25: Restgasanalysen an Siliziumdioxidproben ohne Getter [93].....	57
Abbildung 26: Restgasanalysen an Siliziumdioxidproben mit Getter [93] .....	58
Abbildung 27: Restgasanalyse an vorher aktivierten Gettermaterialien [93] ....	58
Abbildung 28: Generelle Ausfallursachen von Elektronik [106].....	67
Abbildung 29: Einpunkt-Kalibration bei solar-induziertem Memory-Effekt: (a) Sonnenspur nach 2 min Einstrahlung; (b) Sonnenbild nach einer Einpunkt-Kalibrierung [25] .....	70
Abbildung 30: Vergleich der relativen Responsivitäten bei HTOL- und HTSL-Prüfungen und jeweils 115 °C als Mittelwert über 3 Bauelemente .....	78
Abbildung 31: relative exponentielle Vergrößerung des elektrischen Widerstandes bei verschieden Auslagerungstemperaturen.....	79
Abbildung 32: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 100 °C .....	81
Abbildung 33: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 150 °C .....	81

---

Abbildung 34: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 200 °C .....	81
Abbildung 35: relative Rauschänderung gemittelt über 30 Sensoren bei 115 °C HTOL .....	82
Abbildung 36: Vergleich der Transmissionsspektren des Referenzchips, bei der Ausgangsmessung (blau) und der zweiten Messung als Referenz (rot) .....	84
Abbildung 37: Vergleich der Transmissionsspektren eines Deckelchips vor (blau) und nach Alterung (rot) durch die Dampfdruckprüfung .....	85
Abbildung 38: relative Änderung des TCR von Teststrukturen bei verschiedenen Auslagerungstemperaturen .....	87
Abbildung 39: gemessener relativer TCR an aufgebauten Infrarotsensoren .....	88
Abbildung 40: relative Messwerte des TCR und der Responsivität über eine Temperaturlagerung bei 125 °C .....	89
Abbildung 41: Verhältnis der Änderung der Responsivität zum elektrischen Widerstand (grün); und der Änderung des TCRs (blau) zum elektrischen Widerstand bei einer Temperaturlagerung von 115 °C .....	90
Abbildung 42: Vergleich der Gasspektren eines ungestressten und eines gealterten Packages .....	93
Abbildung 43: Messergebnisse der Responsivität $R$ und des Vakuumsensor $VS$ bei 125 °C HTSL in normierter Darstellung .....	95
Abbildung 44: Fitting der Degradationsmessungen mit einer Exponentialfunktion 2. Ordnung .....	96
Abbildung 45: Modellierung der temperaturabhängigen Zeitkonstanten .....	97
Abbildung 46: Vergleich des Degradationsmodells (Linien) mit den Messwerten (Punkten) bei verschiedenen Temperaturen über die Zeit .....	99
Abbildung 47: Vergrößerung der Package-Kavität durch Deckelätzungen, (1) Deckel ohne Aushöhlung, (2) Deckel mit trapezförmiger Aushöhlung, (3) Deckel mit quadratischer Aushöhlung .....	101
Abbildung 48: Deckelschertest am Package .....	109



---

Abbildung 49: Metallinterface eines nicht gealterten exemplarisch aufgebauten Au-Sn Lötrahmens im Querschnitt.....	111
Abbildung 50: Bildung von Poren zwischen Nickel und AuSn nach Alterung bei TC: -50 °C / +150 °C für 1000 Zyklen .....	111
Abbildung 51: EDX-Mapping des Lötrahmens, links Gold, Mitte Zinn, rechts Nickel .....	112
Abbildung 52: Rissbildung am Rande des Lötrahmens zwischen Saatschicht / Haftschicht und Lötrahmen .....	113
Abbildung 53: Schäden der Passivierung und der darunterliegenden Leitbahnen durch Kräfte und Risse an der Außenseite des Lötrahmens...	114
Abbildung 54: simulierte Durchbiegung eines VGA-CSP durch den Innendruck .....	115
Abbildung 55: Deckeldurchbiegung aufgrund des Innendrucks bei verschiedenen Package- / Imager-Größen .....	116
Abbildung 56: Von-Mises-Spannung durch Innendruck gezeigt am Querschnitt eines 3D-Modells (inklusive perspektivischen 3D-Konstruktionslinien in Schwarz) des Chips fokussieren sich am inneren Lötrahmen zum Deckel hin .....	117
Abbildung 57: farbskalierte Von-Mises-Spannung eines simulierten 2D Lötrahmens mit den metallischen Schichten des Lötrahmens, bei Beschleunigung von 1000 G in Y-Achse.....	118
Abbildung 58: 2D Simulation der Von-Mises Spannung bei 150 °C Temperaturbelastung eines Lötrahmens.....	119
Abbildung 59: 3D-Sicht Bolometerdesign mit einfach zweiseitigen Stegen.....	121
Abbildung 60: Draufsicht weiterer Simulationsmodelle von Bolometern mit vierseitigen Stegen (links) und doppelt-zweiseitigen Stegen (rechts) .....	121
Abbildung 61: Abbildung eines Bolometer unter Beschleunigungskraft von 1000 G in z-Achse und Anzeige der Von-Mises-Spannung .....	122
Abbildung 62: Verschiebung des zweiseitigen Bolometers im Resonanzfall mit farblich codierter Verschiebung.....	124

---

Abbildung 63: Verformung der Bolometer aufgrund von Thermospannungen von 130 °C.....	126
Abbildung 64: HTOL Zuverlässigkeitsprüfaufbau für Infrarotsensoren vom Fraunhofer IMS .....	129
Abbildung 65: schematische Darstellung des Vakuummessprinzips für zwei aufeinander folgende Auslesezyklen Auslese 1 zum Zeitpunkt $t_1$ und Auslese 2 bei $t_2$ , in Blau: die angelegte elektrische Spannung am Bolometer, in Orange: der Temperaturverlauf $T_{\text{Bolo}}$ bei erhöhtem Innendruck / thermischer Leitfähigkeit, in Rot: der Temperaturverlauf $T_{\text{Bolo}}$ bei niedrigem Innendruck / thermischer Leitfähigkeit .....	133
Abbildung 66: erweitertes Ansteuerschema mit zusätzlicher Abkühlphase, mit 3 sequentiellen Auslese- und damit Aufheizzyklen (bis $t_3$ ) .....	134
Abbildung 67: FEM Simulationsergebnisse der Widerstandsänderung $VS$ .....	136
Abbildung 68: schematischer Messaufbau zur analogen Druckmessung an Einzelbolometern.....	137
Abbildung 69: Messkurve der analogen Druckmessung eines Einzelbolometers normiert dargestellt.....	138
Abbildung 70: digital ausgelesene Messwerte des Vakuumsensors: schwarz und grün sind Messung bei der Aufheizphase, gelb beinhaltet eine zusätzliche Abkühlphase.....	139
Abbildung 71: Verhältnis aus dem Abkühlwert zum Heizwert zur Absolutwertmessung.....	140
Abbildung 72: Vergleich der FEM Simulationsergebnisse (blau), der analogen Messung an Einzelbolometern (rot) und an Infrarotsensoren (grün) .....	141
Abbildung 73: Detektion von defekten Pixeln (schwarze Punkte) in einem QVGA-IRFPA mit dem Vakuumsensor .....	143
Abbildung 74: Beispiel eines QVGA Bildes mit den farbcodierten Vakuumsensormesswerten für jedes Pixel zwischen zwei Messzeitpunkten, bei dem die globale Drift herausgerechnet wurde (Index = 0).....	144
Abbildung 75: Fokus auf den Defektbereich in Abbildung 74.....	145

Abbildung 76: Ferninfrarotkamera vom Fraunhofer IMS .....147

Abbildung 77: Vergleich der Messabweichungen des Vakuumsensors, der  
 Rohwerte (blau), mit Spannungsregelung (rot) und mit  
 Temperaturkompensation über den Temperatursensor (grün)  
 .....148

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterscheidung in intrinsische und extrinsische Fehler .....7

Tabelle 2: Zuverlässigkeitsanforderungen für Infrarotsensoren in  
 Weltraumanwendungen [31] ..... 17

Tabelle 3: Modularisierung des IRFPAs mit Beschreibung der Funktionen und  
 abgeleiteten Fehlfunktionen..... 22

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Kleber in ihrer Durchbiegung eines Si-Chips  
 ..... 25

Tabelle 5: degradationsrelevante Parameter der Bolometer-Performance..... 31

Tabelle 6: potentielle mechanische Fehlermechanismen für IRFPAs..... 61

Tabelle 7: Einschätzung thermische Belastungen in potentiellen  
 Applikationsfeldern ..... 66

Tabelle 8: Umweltbelastungen durch Vibrationen [105]..... 66

Tabelle 9: Umweltbelastungen durch mechanischen Schock [105]..... 67

Tabelle 10: Abhängigkeit der Fehlermechanismen von Umwelteinflüssen [106]  
 ..... 68

Tabelle 11: Abdeckung von Fehlermechanismen durch Standardprüfmethoden  
 [104]..... 71

Tabelle 12: Zuverlässigkeitsprüfungen zur Degradation der Deckeltransmission  
 ..... 83

Tabelle 13: Prüfergebnisse der beschleunigten Alterung an Deckelchips ..... 85

Tabelle 14: Restgasanalysen von CSPs vor und nach thermischer Alterung bei 150 °C und 2000 h .....	91
Tabelle 15: Vergleich der Degradation bei 20 °C zwischen Messwerten und Modellberechnungen nach einem Jahr .....	100
Tabelle 16: geprüfte Stromdichten und deren Verhältnis zur Applikationsstromdichte $J_0$ .....	104
Tabelle 17: Widerstandsänderungen bei den Strombelastungstests .....	105
Tabelle 18: Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen am Package .....	106
Tabelle 19: Modellparameter Coffin Manson Modell [50] .....	108
Tabelle 20: Ergebnisse der Deckelschertests .....	110
Tabelle 21: Ein Vergleich der Durchbiegung eines Chips durch den Innendruck bei verschiedenen Packagegrößen .....	115
Tabelle 22: Verschiebungen $dm$ und Von-Mises Spannung $\sigma_M$ bei Beschleunigungen in z-Achse eines zweiseitigen Bolometers .....	123
Tabelle 23: Vergleich der Von-Mises-Spannung $\sigma_M$ und der Verschiebungen $dm$ für zweiseitige, vierseitige, doppelt-zweiseitige Bolometer bei einer Beschleunigung von 1000 G in alle drei Raumachsen ...	123
Tabelle 24: Vergleich der niedrigsten vier Eigenfrequenzen bei verschiedenen Bolometerdesigns .....	125
Tabelle 25: Messverfahren zur Bestimmung des Package-Innendrucks .....	130
Tabelle 26 Stand der Technik und optimierter Prüfaufbau durch Vakuumsensor bei Zuverlässigkeitsprüfungen .....	146

---

# Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bedeutung
AC	Autoclave
a-Si	amorphes Silizium
Au	Gold
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor
CSP	Chip-Scale-Package
Cu	Kupfer
CVD	Chemical Vapor Deposition
DLP	Mikrospiegelarray (Digital Micromirror Device)
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie
FEM	Finite-Elemente-Methode
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
H	Wasserstoff
HTOL	High Temperature Operating Life Test
HTSL	High Temperature Storage Life
IC	Integrated Circuit
IR	Infrarot
IRFPA	infrared focal plane array
JEDEC	Joint Electron Device Engineering Council
MTTF	mean time to failure
QVGA	Quarter VGA 320x240 Pixel
REM	Rasterelektronenmikroskop
RH	relative Feuchtigkeit

---

---

ROIC	Readout Integrated Circuits
SEM	Sekundärelektronenmikroskop
Si	Silizium
SLID	Solid-Liquid Interdiffusion
Sn	Zinn
TEC	Temperaturcontroller
TC	Temperature Cycling
TiN	Titannitrid
VGA	Video Graphics Array; 640×480 Pixeln
VS	Messwerte des Vakkumsensors
XGA	Extended Graphics Array; 1024 x 768 Pixel
ZUV	Zuverlässigkeit

---

## Formelzeichen

---

Symbol	Bedeutung
$A$	Fläche
$A_{\text{Bolo}}$	Bolometer Pixelfläche
$AF$	scheinbarer Beschleunigungsfaktor
$A_{\text{CM}}$	Materialkonstante Coffin-Manson Modell
$B$	Vorfaktor der Exponentialfunktion
$\beta$	Bolometer Füllfaktor
$B_{\text{CM}}$	empirischer Modellfaktor Coffin-Manson
$c$	spezifische Wärme pro Molekül
$C(t)$	Anzahl an Ausfällen
$C_{\text{CM}}$	Modellparameter Coffin-Manson

---

---

$C_{\text{Th}}$	Wärmekapazität
$\gamma_s$	Oberflächenbruchenergie
$d$	Wanddicke
$D$	Abstand der Wände für Gasaustausch
$\delta$	Moleküldurchmesser
$\bar{D}$	Mittelwert der Pixel-Digitalwerte $D_i$ über alle Frames $i$
$\Delta\varepsilon_p$	plastische Materialdehnung
$D_i$	digitaler Messwert des Bolometer-Pixel im $i$ -ten Frame
$d_K$	Korngröße
$d_m$	mechanische Verschiebungen
$\Delta T_{\text{App}}$	Temperaturschwankung in Applikation
$\Delta T_{\text{Stress}}$	Temperaturschwankung in Stresstest
$E$	elektrische Feldstärke
$E_a$	Aktivierungsenergie
$\varepsilon$	Absorbtionsfaktor
$\varepsilon_k$	materialspezifischer Emissionskoeffizient
$\varepsilon_m$	mechanische Dehnung
$f(t)$	Fehlerdichtefunktion
$F(t)$	Summenfehlerrate
$f_i$	Bild Wiederholungsrate
$F_m$	molekularer Gasfluss (Volumen pro Sekunde)
$f_s$	Shutter Frequenz des Bolometer Array
$F_Z$	F-Zahl der Infraroptik
$G_{\text{Gas}}$	thermische Leitfähigkeit durch Gase
$G_{\text{Gas } 1}$	thermische Leitfähigkeit durch Gase zwischen Bolometer und Substrat
$G_{\text{Gas } 2}$	thermische Leitfähigkeit durch Gase zwischen Bolometer und Deckel
$G_{\text{Rad}}$	thermische Leitfähigkeit durch Radiation

---

---

$G_{rms}$	Effektivwert der Vibrationsbeschleunigung
$G_{Steg}$	thermische Leitfähigkeit durch Bolometerstege
$G_{Th}$	thermische Gesamtleitfähigkeit
$H_1$	Fitting Parameter Verstärkungsfaktor
$I$	elektrischer Strom
$I_{Bolo}$	elektrischer Bolometerstrom
$I_{ROIC}$	Rauschstrom vom ROIC Eingang und Bolometerspannungsquelle
$J$	Stromdichte
$\nabla j$	Gradient der Stromdichte
$J_n$	Stromdichte bei verschiedenen Belastungsstufen
$J_0$	Applikationsstromdichte im Bolometer
$k$	Boltzmann Konstante
$K$	1/f konstante des Bolometer Sensormaterials
$k_B$	Boltzmann Konstante = $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
$K_p$	Permeabilitätskoeffizienten
$l$	Länge
$L$	mittlere freie Wegstrecke
$l_R$	Risslänge
$\lambda_m$	materialspezifische thermische Leitfähigkeit
$\lambda$	Fehlerrate
$\lambda_{Gas}$	thermische Leitfähigkeit durch Gasmoleküle
$\lambda_{Substrat}$	thermische Leitfähigkeit des Substrates
$M$	Konstante für NETD Rauschberechnungen
$m_M$	Molekülmasse
$n$	Anzahl an Videobildern
$N_f$	Zyklenzahl bis Ausfall
$n_{Gas}$	Menge an Gasmolekülen

---



---

$NETD$	Noise-equivalent temperature difference
$NETD_{1/f}$	$f^{-1}$ -Rauschens
$NETD_R$	Gesamtrauschen
$NETD_{ROIC}$	Rauschen durch die Ausleseschaltung
$NETD_P$	Rauschen durch thermische Fluktuationen / Phononenrauschen
$NETD_T$	Wärmerauschen
$N_0$	Gesamtzahl an BE
$N_Z$	Zyklenzahl
$P$	Permeabilitätskonstante
$\Delta p$	Druckdifferenz
$\Delta P / \Delta T$	Temperatur-Kontrast
$P_{Bolo}$	elektrische Bolometeransteuerleistung
$\Delta p_L$	Partialdruck des Leckgases
$\Delta p_P$	Druckanstieg im Package
$\phi$	Transmissionsfaktor
$p_G$	Gasdruck im Package
$p_L$	Partialdruck des Leckgases
$p_{Permeation}$	Gesamtdruckanstieg durch Permeation
$p_{p\_Si}$	Packagedruck durch Permeation durch Silizium
$p_{p\_LR}$	Packagedruck durch Permeation durch Löttrahmen
$\vec{q}$	Wärmestromdichte
$q_{Gas}$	Wärmestrom
$Q_{Adsorption}$	Leckrate durch Adsorption
$Q_{Desorption}$	Leckrate durch Ausgasung
$Q_j$	erzeugt Wärme durch Joulsche Erwärmung
$Q_{Leckstrom}$	Leckrate durch Mikrolecks
$Q_P$	Permeationsrate

---

---

$Q_{\text{Permabilität}}$	Leckstrom durch Permeation
$\dot{Q}_{\text{Rad}}$	Wärmeleistung durch Radiation
$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand
$R$	Responsivität
$R_{\text{Bolo}}$	elektrische Bolometer Widerstand
$R_{\text{Gas}}$	universelle Gaskonstante = $8,3144621 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$R_{\text{ROIC}}$	Eingangsimpedanz des ROIC
$\sigma$	Stefan-Boltzmann Konstante = $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
$\sigma_{\text{el}}$	elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_{\text{f}}$	Bruchspannung
$\sigma_0$	Vorfaktor Leitfähigkeit
$\sigma_{\text{K}}$	Spannungsintensitätsfaktor
$\sigma_{\text{m}}$	mechanische Spannung
$\sigma_{\text{M}}$	Von-Mises Spannung
$R_0$	Exponent der Exponentialfunktion
$S1, S2, S3$	Modellparameter Sigmoidalfunktion
$ss$	Probengröße
$\text{Std}$	Standardabweichung
$t$	Zeit
$T$	Temperatur
$\tau$	thermische Zeitkonstante
$\tau_{\text{FIT 1}}$	Fitting Parameter Zeitkontante 1
$\tau_{\text{FIT 2}}$	Fitting Parameter Zeitkontante 2
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$t_{\text{Bolo}}$	Auslesezeit der Bolometer
$T_{\text{Bolo}}$	Bolometer Membran Temperatur
$TCR$	Temperaturkoeffizient des Widerstandes
$T_{\text{Bolo}}$	Bolometermembrantemperatur

---

---

$T_{\text{Dig}}$	Messwert des digital Temperatursensors
$T_{\text{S}}$	Temperatur des IRFPA Substrat
$U$	elektrische Spannung
$U_{\text{Bolo}}$	Bolometerspannung
$U_{\text{n}}$	totale Rauschspannung
$V$	Kavitätsvolumen
$\bar{v}$	mittlere molekulare Geschwindigkeit
$V_{\text{Amp}}$	Eingangsreferenz-Rauschspannung
$V_{\text{ROIC}}$	Gesamtrauschen des ROIC
$V_{\text{Q}}$	Eingangs Referenz ADC Quantisierungsintervall
$VS$	Messwerte des Vakuumsensors
$\omega$	Reziproke der Bildauslesefrequenz
$x_l$	Anzahl an Bolometerpixel pro Read out frame
$y_0$	Modellparameter Offset der Exponentialfunktion
$Z$	Zuverlässigkeit

---



# 1 Einleitung

Die in der vorliegenden Arbeit auf ihre Zuverlässigkeit untersuchten ungekühlten QVGA Infrarotsensoren basieren auf Mikrobolometern und sind Stand der Technik für bildgebende Infrarotsysteme. Diese bieten viele Vorteile gegenüber herkömmlichen gekühlten Infrarotsensoren, wie ihre geringe Größe und Energiebedarf, die Möglichkeit der Massenproduktion und die damit verbundenen niedrigen Herstellungskosten. Darüber hinaus können heutzutage Leistungen erreicht werden, die man vorher nur von gekühlten Systemen kannte. Dadurch ergeben sich viele neue Anwendungsgebiete in Bereichen wie Automobiltechnik, Militär, Sicherheit, Bautechnik und Überwachung, mit einem ständig wachsenden Markt (mit über 100.000 Stück pro Jahr aktuell) [1].

Unabhängig davon wie stark die Sensoren in diesen Anwendungsgebieten belastet werden, dürfen sie nicht ausfallen, da sonst Menschenleben gefährdet, Kunden enttäuscht oder wirtschaftliche Schäden verursacht werden können. Zudem werden mikroelektronische Produkte durch deren ständige Weiterentwicklung in Funktion und Aufbau immer komplexer, kleiner und vielfältiger. Da sich damit auch die Komplexität und Miniaturisierung derer Herstellungsprozesse steigert, hat dies auch einen direkten Einfluss auf die Zuverlässigkeit.

Zurzeit gibt es keine recherchierbaren und wissenschaftlich fundierten Untersuchungen über die Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Prüfmethode oder Fehlermechanismen von Infrarotsensoren. Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, diese Themenbereiche ausführlich zu untersuchen, da es nur so möglich ist, ein kommerziell erfolgreiches Produkt zu entwickeln, das alle Anforderungen erfüllt, sicher funktioniert und den Kunden zufrieden stellt.

Dafür werden in dieser Arbeit Zuverlässigkeitsprüfungen geplant, durchgeführt, ausgewertet und die relevanten Fehlermechanismen untersucht. Mögliche Optimierungen der Zuverlässigkeit werden darauf hin abgeleitet und Zuverlässigkeitsmodelle entwickelt. Zudem wird eine innovative Prüfmethodik entwickelt und untersucht, die für die Bestimmung der Zuverlässigkeit von Infrarot-

sensoren und die Durchführung von Zuverlässigkeitsprüfungen eingesetzt werden kann.

Dieses Prüfverfahren überwacht alle zuverlässigkeitsrelevanten Eigenschaften von Infrarotsensoren, ohne zusätzliches Messequipment zu benötigen. Damit wird es nicht mehr nötig, die Sensoren an einem Messplatz [2] vollständig elektro-optisch zu charakterisieren. Idealerweise können die Sensoren während der Zuverlässigkeitsprüfung automatisch und nahezu zeitkontinuierlich überwacht werden, wodurch manuelle Prozesse, Kosten und Zeit massiv eingespart werden können.

Die in der vorliegenden Arbeit aufgeführten Untersuchungen werden anhand der vom Fraunhofer IMS hergestellten Infrarotsensoren durchgeführt. Diese basieren auf 17  $\mu\text{m}$  großen Bolometern aus amorphem Silizium und einem ebenfalls vom Fraunhofer IMS entwickelten Chip-Scale-Package. Die hier gewonnen Erkenntnisse können jedoch auch auf vergleichbare Technologien übertragen werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Ziele der Zuverlässigkeit

#### Ziel der Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Eine der größten Herausforderungen bei der Kommerzialisierung von MEMS (engl.: micro-electro-mechanical system) ist die Untersuchung und Sicherstellung ihrer Zuverlässigkeit. Dies ist unabdingbar um ein finanziell erfolgreiches Produkt mit hoher Robustheit, geringen Ausfallraten und langer Lebenserwartung zu erzeugen, das am Ende den Kunden zufrieden stellt.

Mit Hilfe von Zuverlässigkeitsuntersuchungen kann die Robustheit gegen Umweltbelastungen und die mögliche Lebensdauer bestimmt werden. Dabei werden kritische und fehleranfällige Produkteigenschaften oder potentielle Designschwächen identifiziert und optimiert, um die gewünschte Zuverlässigkeit zu erreichen.

#### Erfolgsgeschichte DLP

Ein gutes Beispiel für eine sehr erfolgreiche Zuverlässigkeitsuntersuchung und der darauf basierenden Verbesserung des Produkts sind die Mikrospiegelarrays (DLP) der Firma Texas Instruments, die z. B. für Projektoren eingesetzt werden [3]. Auch nach tausenden Stunden im Einsatz zeigen sich kaum Pixelausfälle und eine hohe Zuverlässigkeit. Um dies zu erreichen, wurden umfangreiche Prüfungen durchgeführt und die relevanten Fehlermechanismen analysiert und ihr Einfluss erheblich minimiert.

#### Einordnung der Arbeit

Es gibt mehrere Ebenen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen auf Die-Level, Komponenten-Level, Board-Level, Modul-Level und System-Level. In dieser Arbeit geht es um die Komponente, also das Sensorelement an sich, das möglichst applikations- und systemunabhängig untersucht werden soll.

Für die Fertigung von Produkten muss nicht nur das Produkt selbst, sondern der komplette Herstellungsprozess qualifiziert werden. Eine erfolgreich Marktreife von MEMS benötigt zuverlässige und stabile Herstellungsprozesse [4]. Diese Arbeit konzentriert sich jedoch nur auf den Bereich der Produktqualifizierung und nicht auf die Qualifizierung von Designs, Prozessen oder des Unternehmens selbst.

## 2.2 Definition und Parameter der Zuverlässigkeit

### Definition Qualität:

Qualität wird nach DIN ISO 8402: 1995-08 definiert als: „die Gesamtheit von Merkmalen (und Merkmalswerten) einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse (Qualitätsforderungen) zu erfüllen“.

### Definition Zuverlässigkeit:

Nach DIN 40041:1990-12 wird die Zuverlässigkeit definiert als: „Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen.“

Zuverlässigkeit wird laut dem japanischen Industrie Standard JIS beschrieben als Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt seine erforderte Funktion unter spezifischen Bedingungen für eine spezifische Zeitdauer erfüllt. Die Zuverlässigkeit  $Z(t)$  kann somit als Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Zeit bezeichnet werden und bildet das Verhältnis aus den Produkten, die überlebt haben ( $C(t)$  ist die Anzahl der Ausfälle) zur Gesamtzahl  $N_0$ .

$$Z(t) = \frac{N_0 - C(t)}{N_0} \quad (2.1)$$

Das Gegenstück der Zuverlässigkeit  $Z(t)$  wird als Summenfehlerrate  $F(t)$  bezeichnet.



$$F(t) = C(t) / N_0 = 1 - Z(t) \quad (2.2)$$

Die erste Ableitung der Summenfehlerrate ist die Fehlerdichtefunktion  $f(t)$

$$f(t) = dF(t) / dt = -dZ(t) / dt \quad (2.3)$$

Oft ist nicht von Interesse, wie wahrscheinlich ein Fehler ist, sondern wie lange es im Durchschnitt bis zu einem Fehler oder Ausfall dauert. Dabei beschreiben die Zeiten  $t_5$ ,  $t_{10}$  und  $t_{50}$ , die Zeit bis zum Ausfall von 5 %, 10 % oder 50 % der Bauteile. Oft verwendet wird der *MTTF* (mean time to failure) Wert, die mittlere Zeit bis zum Ausfall, die bei Normalverteilung der  $t_{50}$  entspricht [5]. Sie wird nach IEC 60050 definiert als „der Erwartungswert der Zeit bis zum Ausfall“.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} Z(t) dt \quad (2.4)$$

Die Fehlerrate  $\lambda(t)$  beschreibt die Anzahl an Fehler pro Zeit und stellt eine elementare Größe bei Zuverlässigkeitsberechnungen dar.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{Z(t)} = -\frac{dZ(t)}{dt} * \frac{1}{Z(t)} = \frac{-d \ln(Z(t))}{dt} \quad (2.5)$$

$$Z(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (2.6)$$

Standardmäßig wird die Fehlerrate in der Einheit FIT =  $10^{-9}$  Fehler / Stunde beschrieben, da diese meist sehr klein ist.

Die Badewannenkurve ist eine geeignete Möglichkeit, um die komplexen Ausfallsysteme zu bewerten. Diese Methode konzentriert sich nicht auf statistische Genauigkeit sondern darauf, dass man die Problematik segmentieren kann. Jedes der Segmente kann dann einzeln betrachtet und die Risiken bewertet werden.

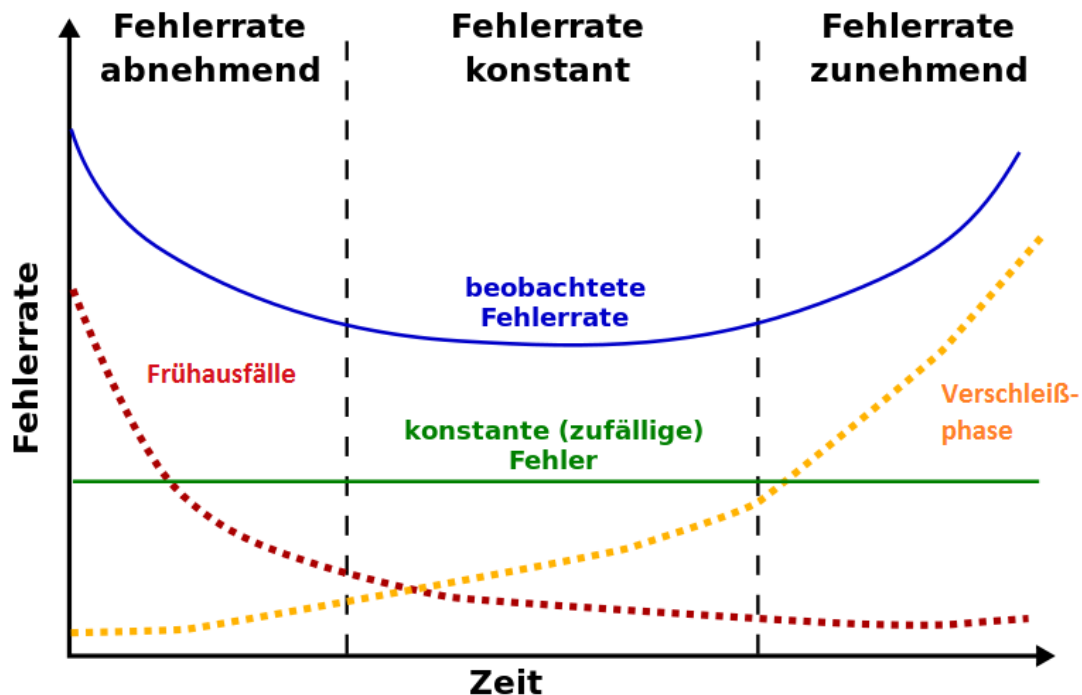


Abbildung 1: Darstellung der Fehllerrate im Form einer Badewannenkurve [6]

#### Phase I: Frühausfälle

Frühausfälle kommen durch Produktionsfehler zustande und werden durch eine hohe Fehllerrate mit fallender Kurve der Ausfallrate charakterisiert. Viele solcher fehlerhaften Bauteile fallen bereits während des Fertigungsprozesses aus und können aussortiert werden. Einige überstehen diese Prozesse jedoch und fallen dann nach kurzer Belastungszeit aus.

#### Phase II: Zufallsausfälle

Der nutzbare Lebensabschnitt von MEMS wird durch die Frühausfälle auf der einen Seite und durch die Verschleißphase auf der anderen Seite beschränkt. Die Ausfallrate ist hierbei idealisiert konstant und beschreibt die Anzahl der Ausfälle in z. B. 1000 Stunden. Ausfälle werden hauptsächlich durch Zufallsausfälle und Fehler durch äußere Belastungen verursacht.

### Phase III: Verschleißphase

Die nutzbare Lebensdauer von MEMS oder ICs (integrated circuits) wird maßgeblich durch die Verschleißphase, mit steigender Ausfallrate, begrenzt. Ist die Ausfallrate der Lebensdauerverteilung konstant, ist die *MTTF* der Kehrwert der Ausfallrate  $\lambda = 1/MTTF$ .

### Definition Fehler

Zunächst müssen Begrifflichkeiten geklärt werden, die oft zu Verwirrungen führen. Der beobachtete Fehler (z. B. offener Kontakt) wird als Fehlermodus oder hier auch als Ausfallerscheinung bezeichnet. Der Fehlermechanismus hingegen ist die Ursache des Ausfalls (z. B. loser Bonddraht), welcher durch physikalische Effekte (z. B. mechanischer Bruch) hervorgerufen wird. Die Schwierigkeit hierbei ist es, diese Begriffe voneinander zu trennen, was nicht immer sauber möglich ist.

Tabelle 1: Unterscheidung in intrinsische und extrinsische Fehler

Kategorie	Intrinsische Fehler	Extrinsische Fehler
Ursache	Material und Design	Prozesstoleranzen
Auftreten	Systematisch	Zufällig
Zeitpunkt des Ausfalls	Verschleiß	Frühausfälle
Stichprobenumfang	Klein	Groß

Prinzipiell gibt es zwei Fehlertypen, die zum Ausfall führen können. Extrinsische Fehler werden an qualifizierten und in Serie produzierten Produkten regelmäßig untersucht. Die Fehler resultieren aus Prozessschwankungen oder Fehlprozessierungen. Die somit zufällig auftretenden Fehler führen meist zu Frühausfällen und können über hinreichend große Stichprobenprüfungen statistisch erfasst werden. Diese Untersuchungen zur Sicherung der Zuverlässigkeit von kommerziellen Produkten sind für die Produktion, aber nicht für diese Arbeit relevant. Hier sollen hingegen die intrinsischen Fehler untersucht werden, die design- oder materialbedingt systematisch auftreten und die Grenzen der Lebensdauer

bestimmen. Jedoch können die in der vorliegenden Arbeit bestimmten Prüfmethode n auch zur Analyse extrinsischer Fehler genutzt werden.

### **2.3 Theorie der beschleunigten Alterung**

In der Praxis bedeutet Zuverlässigkeit, dass das Produkt den Belastungen, die es aus der Anwendung und durch Umwelteinflüsse erfährt, widersteht. Typische Umwelteinflüsse, die zu Alterung führen, sind elektrische, chemische, thermische, mechanische und strahlungsbasierte Belastungen.

Mechanische und thermomechanische Einflüsse führen zu elastischen und plastischen Verformungen und damit zu Rissen und Schäden im Materialgefüge. Bei zunehmender Anzahl an Lastwechseln akkumulieren sich diese Schäden, Risse breiten sich aus und führen zu zunehmender Materialermüdung, bis hin zum kompletten Materialversagen. Weiterhin führen chemische Einflüsse und Feuchtigkeit zu Korrosion und chemischen Reaktionen, die wiederum das Materialgefüge schwächen können. Der Haupteinflussfaktor für Alterungseffekte ist jedoch meist die Temperatur, welche nahezu alle chemische Reaktionen und damit eine Vielzahl an Fehlermechanismen beschleunigt.

Materialien versagen auch dann, wenn die zyklische Belastung weit unter ihrer maximalen Bruchfestigkeit liegt. Diese Ausfallerscheinungen nennt man Ermüdungsausfälle, die den rechten Anstieg der Badewannenkurve bilden und maßgeblich die Produktlebensdauer begrenzen. Mechanische Ermüdungen bestehen aus drei Phasen [7], Rissinitiierung, Risswachstum und finaler Festigkeitsbruch.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Zuverlässigkeit und damit der Fehlermechanismen. Führt man die Prüfungen unter Applikationsbedingungen durch, wären die Kosten, Testzeiten und die Anzahl der benötigten Prüflinge extrem hoch. Folglich müssen die Sensoren beschleunigt gealtert werden, indem sie den möglichen oder relevanten Umwelteinflüssen in hoher Intensität

ausgesetzt werden. Diese erfolgt mit Hilfe von Zuverlässigkeitsprüfmethoden, bei denen die Sensoren mit hoher Intensität, Belastungsdauer oder Zyklenzahl gestresst werden. Aus Kosten- und Zeitgründen müssen diese Prüfungen möglichst schnell erfolgen. Jedoch müssen die Intensitäten vorsichtig gewählt werden, da bei zu hohen Belastungen ungewollte und für den realen Betrieb nicht relevante Fehlermechanismen generiert werden.

Die Zuverlässigkeitsprüfungen werden mit Hilfe standardisierter Prüfungen durchgeführt, damit die Prüfungen einheitlich, konsistent und vergleichbar sind. In den hier durchgeführten Prüfungen wurde der JEDEC-Standard für mikroelektronische Produkte angewendet. Die konkret nötigen Prüfungen hängen von den Fehlermechanismen und Applikationsbedingungen ab und werden in dieser Arbeit bestimmt und untersucht.

Die Schwierigkeit bei beschleunigter Alterung besteht darin, dass der Beschleunigungsfaktor in der Applikation wie auch in dem Test gleich sein muss. Daher wird der Stresslevel schrittweise erhöht und das Prinzip von Sedyakin ausgenutzt [8]. Dieses Gesetz besagt [9], dass bei zwei identische Populationen mit unterschiedlicher Stressbelastung  $x_1$  und  $x_2$ , zwei Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  gleichwertig sind, wenn deren Ausfallwahrscheinlichkeit gleich ist.

$$Z_{x_1}(t_1) = Z_{x_2}(t_2) \quad (2.7)$$

## 2.4 Methodischer Ansatz zur Bestimmung der Zuverlässigkeit

Im Folgenden wird eine systematische Methodik vorgestellt, mit der die Zuverlässigkeit von Infrarotsensoren, aber auch anderer MEMS untersucht werden kann.

In Fällen, wo die Anzahl an Prüflingen begrenzt ist, sind große statistische Studien für die Zuverlässigkeitsuntersuchung praktisch ungeeignet. Stattdessen ist eine Herangehensweise mit Modellen, Simulationen und Materialwissenschaft-

ten in die Zuverlässigkeitsvorhersagen sinnvoller und führt damit auch zu einer wissenschaftlich fundierten Zuverlässigkeitsuntersuchung.

Einfache Modellversuche zur methodischen Bestimmung der Zuverlässigkeit von MEMS wurden in [10] und [11] vorgestellt. Ein detaillierteres und geeigneteres Modell wurde hier erarbeitet und in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

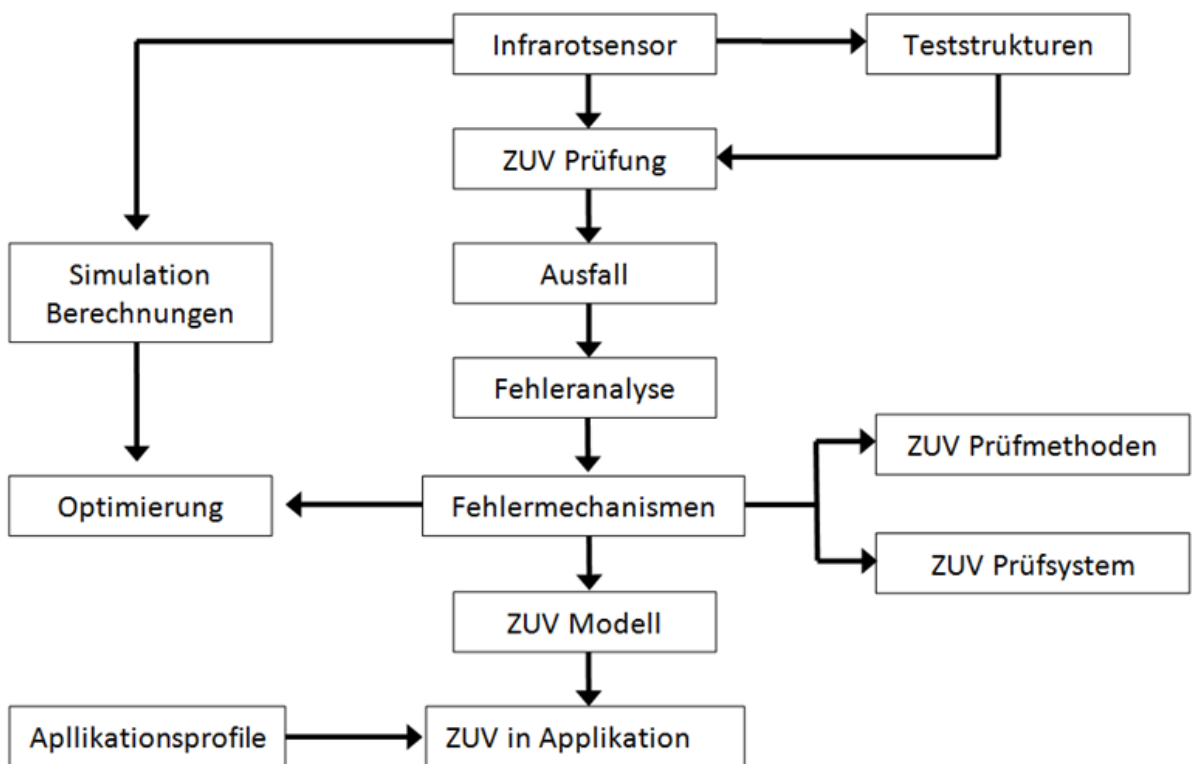


Abbildung 2: Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit

Ausgangspunkt ist eine Analyse des Infrarotsensors. Dieser wird in Kapitel 4 in seine Technologiemodule aufgeteilt, damit diese hinsichtlich relevanter Fehlermechanismen untersucht werden können. Über die Kenntnis der potentiellen Fehler können Zuverlässigkeitsprüfungen (Kapitel 4.5) zur beschleunigten Alterung ausgewählt werden.

Dabei wird solange geprüft bis eine hinreichend lange Prüfzeit absolviert wurde oder es zum Ausfall gekommen ist. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 eine Fehleranalyse, die die Fehlermechanismen bestimmt und untersucht. Dabei bedient man sich auch an Teststrukturen, mit denen Fehlermechanismen gezielt und isoliert untersucht werden können.

Über experimentelle Versuche und Simulationen können Fehlermechanismen und Schwachstellen im Sensor analysiert werden. Folglich können Optimierungspotentiale für die Entwicklung abgeleitet werden, mit denen die gewünschte Zuverlässigkeit erreicht werden kann.

Das Package und die Bolometer können so designt werden, dass die individuell gewünschten Zuverlässigkeitsparameter erreicht werden. Wird das Design auf die Zuverlässigkeit hin überdimensioniert, werden unnötige Kosten oder eine Vergrößerung des Chips verursacht. Auf der anderen Seite können über das Wissen der Zuverlässigkeit Strukturen auch gezielt reduziert werden, um so Kosten im Herstellungsprozess zu verringern oder die Lebensdauer gewollt zu begrenzen, um betriebswirtschaftliche Ziele optimieren zu können.

Auf Grundlage der gewonnen Daten aus den Zuverlässigkeitsprüfungen und den analysierten Fehlermechanismen können Berechnungsmodelle für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer gewonnen werden. Mit Hilfe der dabei berechneten Beschleunigungsfaktoren können die aus den Prüfungen ermittelten Lebensdauern nun auf die realen Applikationsbelastungen übertragen werden.

Mit einem Zuverlässigkeits-Prüfsystem können Fehlermechanismen während der Zuverlässigkeitsprüfungen oder auch außerhalb davon überwacht werden. Dieses Prüfsystem wird für Infrarotsensoren in Kapitel 6 beschrieben.

## 2.5 Vorstellung des Infrarotsensors

Ungekühlte Infrarotbildaufnehmer (IRFPA, infrared focal plane array) nutzen die von warmen Objekten emittierte Ferninfrarotstrahlung (FIR) im Wellenlängenbereich zwischen  $8\ \mu\text{m}$  und  $14\ \mu\text{m}$  („Wärmestrahlung“) zur Darstellung von Temperaturverteilungen einer Szene („bildgebende Thermographie“ Abbildung 3) mittels einer Infrarotkamera (IR-Kamera, Bsp.: siehe Abbildung 76). Diese IR-Bildaufnehmer arbeiten passiv, d. h. ohne zusätzliche aktive Beleuchtung einer Szene. Neben der bildgebenden Thermographie, die häufig zur Erkennung von Wärmeverlusten von Gebäuden eingesetzt wird, gibt es weitere Anwendungsgebiete der IR-Bildaufnehmer für Pkw, Lkw (Nachtsicht, Fußgängerschutz), in der Überwachungstechnik, der Temperaturmesstechnik (Thermographie), der Medizin, in der Rüstungsindustrie, bei der Überwachung industrieller Prozesse und in vielen anderen Gebieten. Gekühlte IRFPAs nach dem photonischen Prinzip benötigen aufwändige Kühlung auf ca.  $60\ \text{K}$  –  $100\ \text{K}$ , so dass diese aus Kostengründen für die meisten nichtmilitärischen Anwendungen nicht in Frage kommen [12].

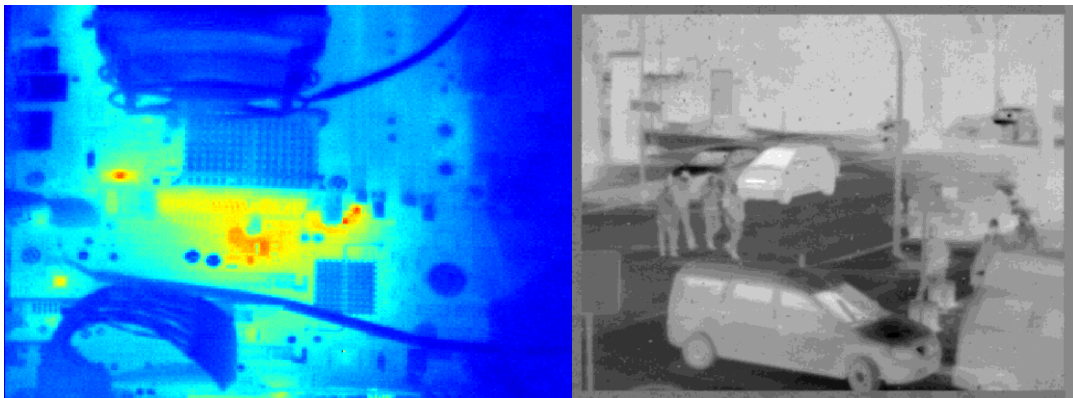


Abbildung 3: Beispielbilder für Infrarotaufnahmen ohne zusätzliche Bildverarbeitung vom Fraunhofer IMS, links aktive Elektronik und rechts Straßenbild in Graustufen

Kommerzielle IRFPAs basieren auf Mikrobolometern als Sensorelemente (Pixel). Diese absorbieren elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich (siehe Abbildung 4) und erhöhen dadurch ihre Membrantemperatur. Dies führt zu einer Veränderung des elektrischen Widerstands des Sensormaterials auf der



Membran, die über eine Ausleseschaltung (ROIC, engl.: Readout Integrated Circuits) elektrisch gemessen wird. Durch den Einsatz mehrerer Bolometer, die als Pixel-Array aufgebaut werden, kann wie bei digitalen Kameras die thermische Strahlung einer Szene gemessen und als 2D Bild dargestellt werden.

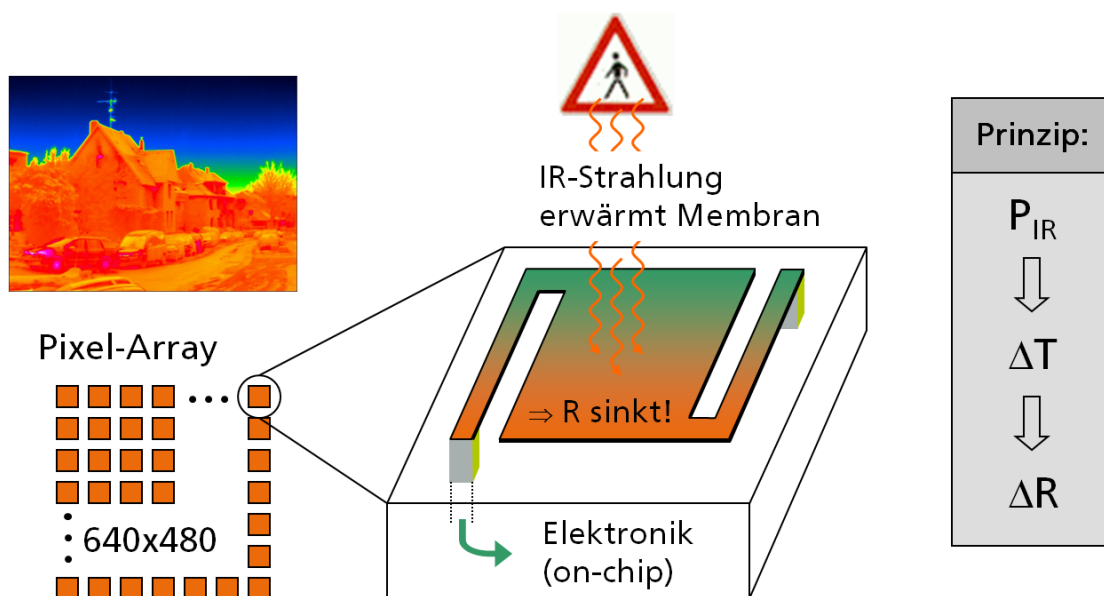


Abbildung 4: Sensorprinzip Bolometer [13]

Neben dieser resistiven Variante existieren zwar noch andere Bolometerprinzipien, wie thermokoppelnde, pyroelektrisch und ferroelektrische Wandlerprinzipien oder Diodenmikrobolometer, die hier aber nicht betrachtet werden.

Ungekühlte IR-Bildaufnehmer bestehen prinzipiell (siehe Abbildung 5) aus einem Mikrobolometer-Array als IR-Bildsensor und einem Vakuumgehäuse mit IR-Eintrittsfenster zur Reduzierung der thermischen Verluste der Mikrobolometer. Eine Ausleseschaltung konvertiert das Eingangssignal der Mikrobolometer in eine elektrische Spannung oder einem digitalen Wert. Für Mikrobolometer werden meist amorphes Silizium (a-Si) oder Vanadiumoxid (VOx) als Sensormaterial eingesetzt. Beides sind amorphe Halbleitermaterialien mit einem hohen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes.

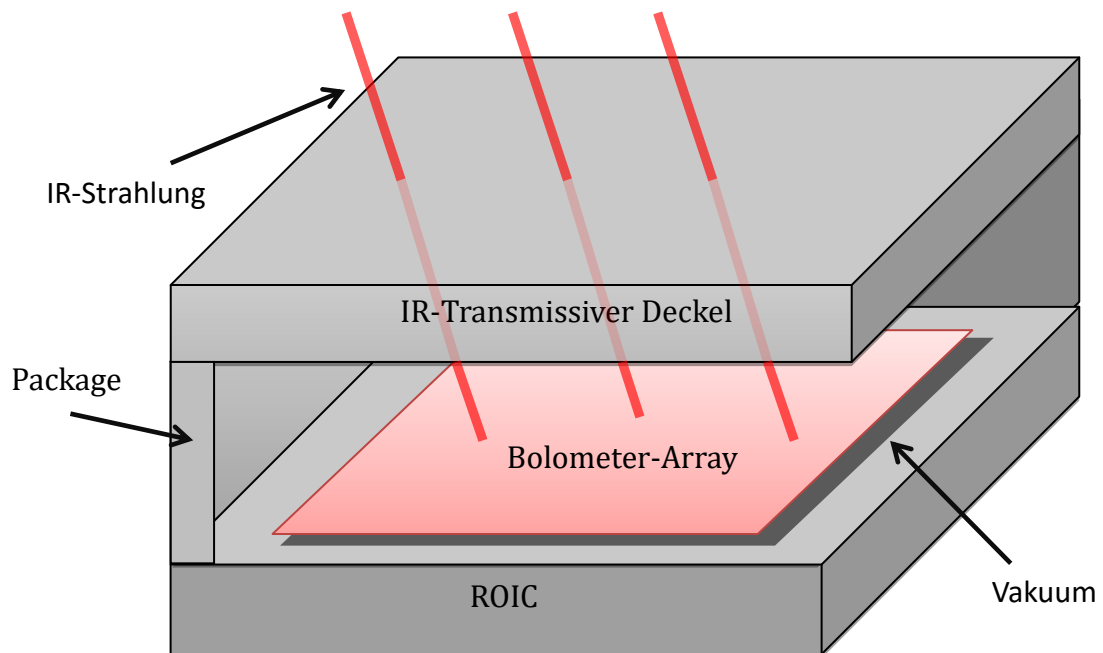


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau eines Infrarotsensors

Abbildung 6 zeigt eine Realisierung auf Systemlevel vom Fraunhofer IMS. Die vom IMS entwickelten Chip-Scale-Packages (CSP) werden auf Platinen aufgebaut und entsprechend mit Drahtbonds versehen. Der hierbei sichtbare Deckelchip beinhaltet eine Antireflexionsschicht zur Maximierung der Transmission für infrarote Strahlung und wird direkt mit dem Substratchip unter Vakuum verlötet.

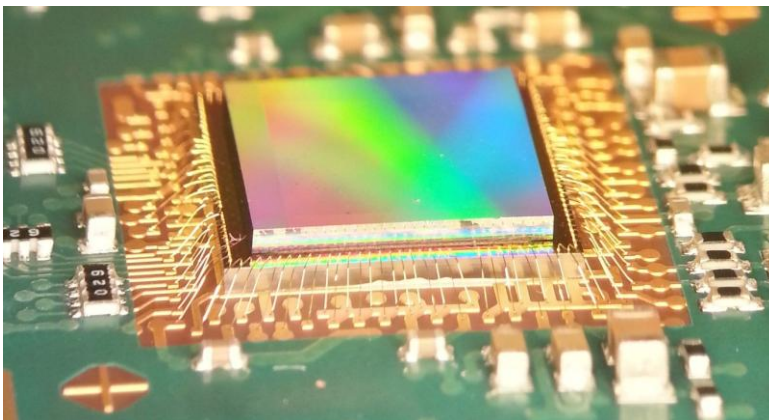


Abbildung 6: Fraunhofer IMS CSP auf Platine aufgebaut

## 3 Stand der Technik

### Aktueller Trend [14]

Halbleitertechnologien entwickeln sich sehr schnell weiter und werden immer kleiner (z. B. 22 nm Wafertechnologie oder CSP), komplexer (z. B. 3D Packages, Package on Package) oder vereinen verschiedene Eigenschaften (z. B. MEMS, CMOS Sensoren). Gleichzeitig steigt aber auch die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten, wobei auch immer anspruchsvollere Umgebungsbedingungen wie hohe Temperaturen oder starke mechanische Kräfte die Bauteile belasten. Damit wird es auch immer schwieriger, die Anforderungen oder Erwartungen an die Zuverlässigkeit zu erfüllen. Standardtestverfahren mit vorgeschriebenen Prüfbedingungen sind damit nicht geeignet, die Zuverlässigkeit zu gewährleisten [14].

Daraufhin wurden die Methoden der Industriestandards ([15], [16]) erweitert. Die neue Herangehensweise geht von den Applikationsbedingungen aus und bewertet mögliche Fehler. Dabei wird stets empfohlen, die Zuverlässigkeit bereits während der Entwicklungsphase zu untersuchen, damit diese durch eine geeignete Auswahl von Designs, Technologien und Materialien optimiert werden kann.

### Infrarotsensoren

Die Herstellungskosten und Zuverlässigkeit des Package hängen stark von der jeweiligen Package-Technologie ab. Im Fokus dieser Arbeit liegen aber Wafer-Scale- oder Chip-Scale-Packages, die besonders günstig in der Herstellung und klein sind und somit eine Kommerzialisierung in großen Stückzahlen ermöglichen [1].

Recherchen über die Zuverlässigkeit von Infrarotsensoren zur Zeit der Erstellung der vorliegenden Arbeit haben keine Informationen ergeben, vor allem, da Hersteller dieses Wissen, sofern vorhanden, nicht publizieren.

Umfangreiche Bücher über Infrarotsensoren von Budzier [17], Kruse [18] oder Rogalski [19] geben zwar detaillierte physikalische und technische Informationen zu Infrarotsensoren, treffen aber keine Aussagen zur Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität.

Führende Hersteller von Bolometer-Infrarotsensoren wie DRS Technologies Inc. [20], BAE Systems [21] und [22] oder Raytheon Vision Systems [23] und [24], beschreiben in Veröffentlichungen aktuelle Entwicklungen und Technologien aber keine Informationen zur Zuverlässigkeit.

In Beschreibungen des Herstellers ULIS für Bolometer-Infrarotsensoren [25] sollen dessen Sensoren die automobilen Normen der AEC-Q100 erfüllen. Die Infrarotsensoren sind jedoch in einem größeren, konventionellen Keramik-Package aufgebaut und verwenden nicht wie das Fraunhofer IMS moderne Chips-Scale-Packages. Es wurden hier einige Alterungstest wie Feuchtigkeit und Temperatur (95°C / 95% RH), Temperaturlagerung (125 °C, 1000 h), Temperaturwechsel (-50 °C / +125 °C, 500 Zyklen) durchgeführt. Jedoch gibt es nur die Aussage, dass sich das Package „gut“ verhält und eine Zuverlässigkeit von 93 % nach 15 Jahren nachgewiesen wurde. Es gibt jedoch keine Information über die für diese Aussage zu Grunde liegenden Modelle, über Fehlermechanismen, einen Einfluss auf die Bolometer oder Degradationserscheinungen. Ein Lebensdauertest mit Temperatur und elektrischer Belastung wurde nicht erwähnt.

Infrarotsensoren haben hohe Anforderungen an den Innendruck und benötigen hierbei langzeitstabil einen Druck von ca.  $10^{-3}$  mbar nach Moraja [26] oder Roxhed [27]. Untersuchungen zu Infrarotsensoren von Niklaus et al. in [1] und [28] benennen ein zuverlässiges hermetisches Package als wichtigstes Zuverlässigkeitsproblem. Dabei muss der Innendruck des Packages kleiner 0,01 mbar [1] sein und über die Lebensdauer erhalten bleiben. Zudem muss die Transmission des infraroten Deckels konstant bleiben. Entscheidend für das Package von Infrarotsensoren sind nach Premachandran [29] die Dichtigkeit und geringe Ausgasraten. Schaufelbuhl et al. weisen [30] noch auf den Schichtstress der Bolometermembranen hin. Dieser entsteht durch die Abscheidungsprozesse

und wirkt meist komprimierend. Um einer Verformung und einem Bruch entgegen zu wirken, wurde gezielt Silizium-Oxidnitrid eingesetzt.

Die Bondstärke von Cu-Sn Wafer-Level-Packages für Bolometer nach Roxhed und Niklaus [27] wurden per Die-Scher Test geprüft. Auch nach 1000 Zyklen bei  $-40\text{ °C} / +150\text{ °C}$  konnte keine signifikante Reduzierung der Scherkräfte oder eine Formation intermetallischer Phasen beobachtet werden. Wobei diese Aussage angezweifelt werden darf, da die Messungen der Scherkräfte große Schwankungen von 14 bis 73 MPa aufweisen und somit eigentlich keinen Einfluss durch Alterung erkennen lassen.

Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Infrarotsensoren in [31] für spezielle Weltraumanwendungen fordern hohe Zuverlässigkeiten und eine hohe Ziellebensdauer von 25 Jahre mit 10 mTorr (ca.  $10^{-2}$  mbar). Das Package wurde mit den Methoden in Tabelle 2 geprüft.

Tabelle 2: Zuverlässigkeitsanforderungen für Infrarotsensoren in Weltraumanwendungen [31]

Prüfung	Prüfmethode nach MIL 883	Parameter
Thermische Zyklen	1010	10 Zyklen $-55\text{ °C} / +125\text{ °C}$
Feuchtigkeit	1004	95 % RH
Konstante Beschleunigung	2001	5000 G in alle Achsen
Mechanische Schocks	2002	500 G, 1 ms in alle Achsen
Vibrationen	2006	20 G, 20 bis 2000 Hz, 4 min, alle Achsen

Das Gehäuse dieser Sensoren ist sehr groß (70 mm Durchmesser), verfügt über ansteuerbare Getter und einen Temperaturcontroller. Dies ist damit allerdings eine nicht vergleichbare Speziallösung, die weder kommerziell verfügbar, klein, stromsparenden noch preiswert ist. Abseits des Packages konnten keine Infor-

mationen über weitere zuverlässigkeitsrelevante Eigenschaften, wie die Stabilität der Bolometer oder der Sensorperformance, ermittelt werden.

Da konkrete Informationen über die Zuverlässigkeit von Infrarotsensoren nicht verfügbar sind, erfolgt eine Analyse vergleichbarer MEMS, die ähnliche Technologien verwenden und daher auch vergleichbare Zuverlässigkeitsprobleme aufweisen sollten.

### Zuverlässigkeit von MEMS

MEMS, wie Beschleunigungssensoren, Gyrosensoren, Drucksensoren, Resonatoren, Relais, Schalter oder Mikropumpen, bieten für den Konsumermarkt viele Vorteile, wie ihre geringe Größe, kostengünstige Herstellung und hohe Integrierbarkeit in Systemen [32].

MEMS können mit steigenden Zuverlässigkeitsanforderungen [33] nach folgender Stufung klassifiziert werden.

- 1) Systeme ohne bewegliche Strukturen (z. B. Inkjet Drucksensoren, Dehnungsmessstreifen, Mikrophone)
- 2) Systeme mit beweglichen Strukturen, aber ohne Reibung und Oberflächenkontakte (z. B. Beschleunigungssensoren, Gyrosensoren, und Resonatoren)
- 3) Systeme mit beweglichen Strukturen und Oberflächenkontakt (z. B. Mikrospiegel Arrays wie der TI DMD, mikrofluidische Ventile und Pumpen)
- 4) Systeme mit beweglichen Strukturen, Reibung und Oberflächenkontakt (z. B. optische Schalter und Winkelreflektoren, Polysilizium Mikromotoren, und mikromechanische Shutter).

Infrarotsensoren würden mit ihren unbeweglichen Bolometern (hier Stufe 1) demnach relativ geringe Anforderung an die Zuverlässigkeit stellen.

Andere MEMS besitzen wie der Infrarotsensor ein hermetisches Vakuum-Package und CMOS-Strukturen für die Elektronik und Ausleseschaltungen. CMOS-Strukturen spielen aber in Veröffentlichungen und Zuverlässigkeitsuntersuchungen kaum eine Rolle. Da deren Fertigungsprozesse seit Jahrzehnten

angewandt, optimiert, gut beherrscht und standardisiert sind, besitzen diese eine hohe Zuverlässigkeit. Zudem besteht kein Bedarf, kleinste Strukturgrößen für die Ausleselektronik zu wählen.

Der größte Unterschied zu diesen MEMS ist, dass Bolometer-Infrarotsensoren keine beweglichen Strukturen besitzen und daher andere Fehlermechanismen dominieren. Der Schwerpunkt liegt stattdessen auf den Bolometer-Strukturen und dem Package. Die Bolometer müssen einerseits mechanische Stabilität aufweisen und dürfen über ihre Lebenszeit nicht ausfallen, da Bildstörungen die Folge wären. Andererseits müssen ihre relevanten elektrischen und optischen Eigenschaften über die Zeit konstant bleiben, um damit eine stabile Performance des Sensors zu gewährleisten. Infrarotsensoren müssen wie andere MEMS auch im Vakuum betrieben werden. Daher ist es gerade bei Infrarotsensoren von entscheidender Bedeutung, dass das Package dicht ist und diese Dichtigkeit über die Lebenszeit und trotz einwirkender Umwelteinflüsse erhalten bleibt. Auch kleine Anstiege des Innendrucks führen zu großen Performanceverlusten. Erschwerend kommt hinzu, dass bereits kleine Gasmengen auf Grund des kleinen Kavitätsumfanges zu großen Druckänderungen führen. Die Dichtigkeit, indirekt gemessen durch den Innendruck, dient als Hauptkriterium für die Bewertung der Qualität des Packages bei Zuverlässigkeitsprüfungen und ist folglich eine der wichtigsten Eigenschaften für Infrarotsensoren und andere MEMS. Der Vorteil des hermetischen Packages ist aber, dass die Sensorelemente und der Die vor Feuchtigkeit, chemischen Einflüssen, Korrosion, Licht und UV-Strahlung geschützt sind und somit diese Umwelteinflüsse keinen relevanten Einfluss auf die Lebensdauer haben.

### CMOS Bildsensoren

Zunächst liegt ein Vergleich mit CMOS Bildsensoren nahe, da der prinzipielle Aufbau und die Einsatzbedingungen ähnlich sind. Das Sensorprinzip ist jedoch verschieden, vor allem aber wird kein hermetisches Vakuum-Package benötigt. Für die Zuverlässigkeit sind hier die Sensoreigenschaften wie Dunkelstrom, Rauschen, spektrale Empfindlichkeit und der Linearitätskennwert am wichtigsten. Für die Lebensdaueranalysen werden nach [34] die stark temperaturab-

hängigen elektrischen und optischen Parameter zeitdiskret gemessen. Relevante Sensorkennwerte wie Empfindlichkeit und Rauschen sollten damit auch bei Infrarotsensoren kritisch sein, da sich diese über eine Alterung nicht verändern dürfen.

### Mikroaktoren

Bei der Untersuchung von Aktoren wie Hf-Schalter und Spiegelarrays konzentriert man sich bei den Fehlermechanismen hauptsächlich auf Oberflächeneffekte wie Haftung, Kontakt und Feuchte [10], [35]. Hauptkriterium zur Lebensdaueruntersuchung sind die Anzahl der absolvierten Schaltzyklen, die es bei Sensoren natürlich nicht gibt.

### Beschleunigungs- und Gyrosensoren

Beschleunigungssensoren benötigen ebenfalls ein hermetisches Package, da die Performance auch vom Innendruck abhängt [36]. Durchgeführte Zuverlässigkeitsprüfungen mit Feuchtigkeit (85 °C / 85 % RH), Temperatur (150 °C, 1000 h), thermischen Zyklen (-40 °C / +125 °C, 1000 x), zeigten allerdings keinen Einfluss auf die Sensorperformance. Es wurde jedoch eine Verringerung der Scherkraft des Packages um 30 % gemessen.

In Zuverlässigkeitsuntersuchungen an Beschleunigungs- und Gyrosensoren sind vor allem die Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität des Vakuum-Package kritisch [37]. Diese wurden insbesondere durch das Wirken äußerer Kräfte wie Vibration und Schock gefährdet. Ähnliche Erkenntnisse werden auch in [38] gewonnen, wo das Ausgasen von hermetischen Wafer-Level Packages die Sensorperformance von MEMS Resonatoren verringert und damit den Hauptfehlermechanismus bildet. Dies ist bei kleinen Packages besonders kritisch, da geringe Erhöhungen der Gasmengen im Package zu großen Druckänderungen führen. Ein Verlust der Hermetizität über die Lebensdauer ist nach [37], [38] und [39] die Hauptfehlerquelle von hermetischen MEMS-Packages und stellt damit einen Fokuspunkt der hier vorgelegten Arbeit dar.



### Fazit

Da es zurzeit kein gezielten und wissenschaftlich fundierten Untersuchungen zu der Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Infrarotsensoren gibt, werden diese Themen in der hier vorliegenden Arbeit untersucht. Wie in diesem Kapitel beschrieben, sind die Themen der mechanischen Stabilität des Packages und der Bolometer sowie die Stabilität der Sensorperformance von Interesse. In diesem Zusammenhang muss auch die potentiell kritische Hermetizität des Package für Infrarotsensoren untersucht werden. Zudem müssen Prüfmetho- den entwickelt werden, mit denen die Zuverlässigkeit der Infrarotsensoren be- stimmt werden kann.

# 4 Fehlermechanismen im Infrarotsensor

## 4.1 Modularisierung des Infrarotsensors

MEMS sind komplexe Systeme, die aus vielen Teilsystemen bestehen. Möchte man Kenntnisse über die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems gewinnen, muss man dieses in Funktionsgruppen zerlegen und gezielt analysieren. Die im Weiteren betrachteten Teilsysteme von Infrarotsensoren sind in Tabelle 3 mit ihren grundlegenden Funktionen und den abgeleiteten Fehlfunktionen dargestellt.

Tabelle 3: Modularisierung des IRFPAs mit Beschreibung der Funktionen und abgeleiteten Fehlfunktionen

Modul	Funktion	Fehlfunktion
ASIC	Auslese der Bolometer Signalverarbeitung	elektrischer Defekt elektrischer Defekt
Bolometer	Wandlung der Infrarotstrahlung Wandlung der Infrarotstrahlung	Bolometer defekt Performance sinkt
Package	Mechanischer Schutz Erhalt Innendruck $< 10^{-2}$ mbar Transmission IR-Strahlung	Package zerstört Innendruck steigt Transmission sinkt
AVT	Mechanische Verbindung mit System Elektrische Kontaktierung mit System	Chip löst sich elektrischer Defekt

### Externe AVT

Die AVT (Aufbau- und Verbindungstechnik) spielt in der Zuverlässigkeit eine große Rolle, da sie neben elektrischen Defekten die Hauptausfallursache bei klassischen ICs ist (siehe Abbildung 7).

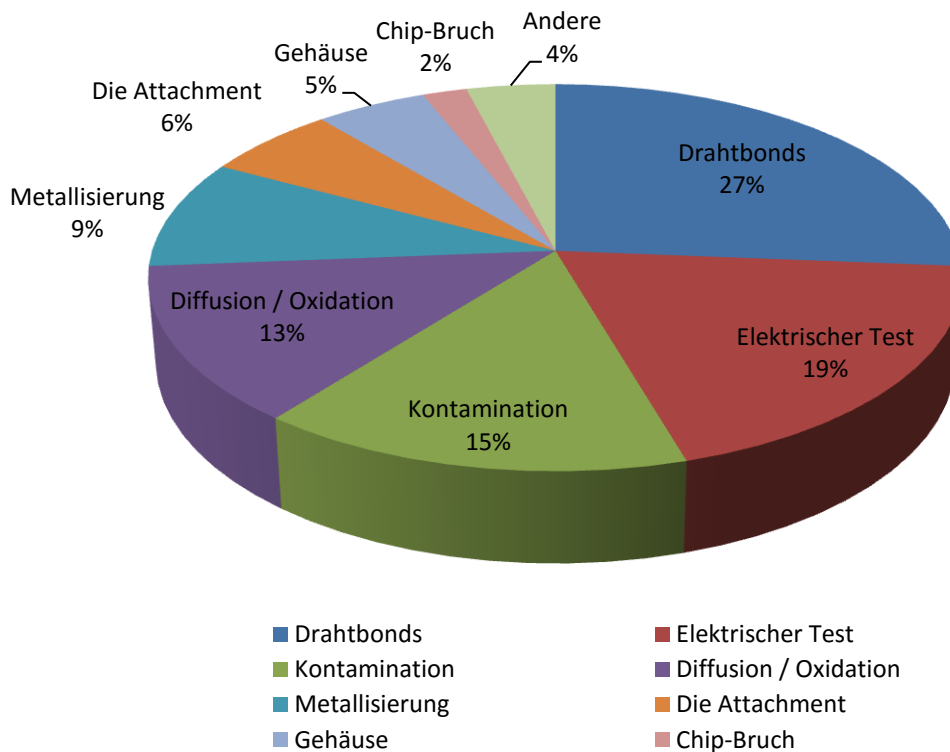


Abbildung 7: Ausfallursachen klassischer ICs [40]

Jedoch gehören die Verfahren der AVT, wie Drahtbonden und Die-Attachment, eher zu Standardfertigungsprozessen und sind in der Ausführung anwendungs- oder kundenspezifisch. Sie stehen daher nicht im Vordergrund dieser Arbeit. Das Package der Infrarotsensoren könnte man zwar auch zur AVT zählen, jedoch wird es hier inhaltlich von diesen getrennt, da es eine Besonderheit der Infrarotsensoren darstellt und besondere Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen muss.

### Die Attach

Die Verbindung des Infrarotsensors mit der Platine über einen Epoxidkleber kann durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, den Montageprozess und Schrumpfung durch den Aushärteprozess zu mechanischen Spannungen führen. Die Folge wäre eine erhöhte Materialbelastung und ein möglicher Bruch des Package oder des Chips. Daher sollten Kleber mit einem geringen Elastizitätsmodul eingesetzt werden.

Folgende, am Fraunhofer IMS durchgeführte Versuche zeigen den Einfluss des Klebers auf die Materialbeanspruchung des Dies. Als Prüfling dient ein 9 x 9 mm großer Silizium-Chip, der über verschiedene Kleber auf eine FR4-Platine aufgeklebt wurde. Nach dem Die-Attach wurde die Durchbiegung des Siliziumchips an einem optischen Profilometer gemessen (siehe Abbildung 8).

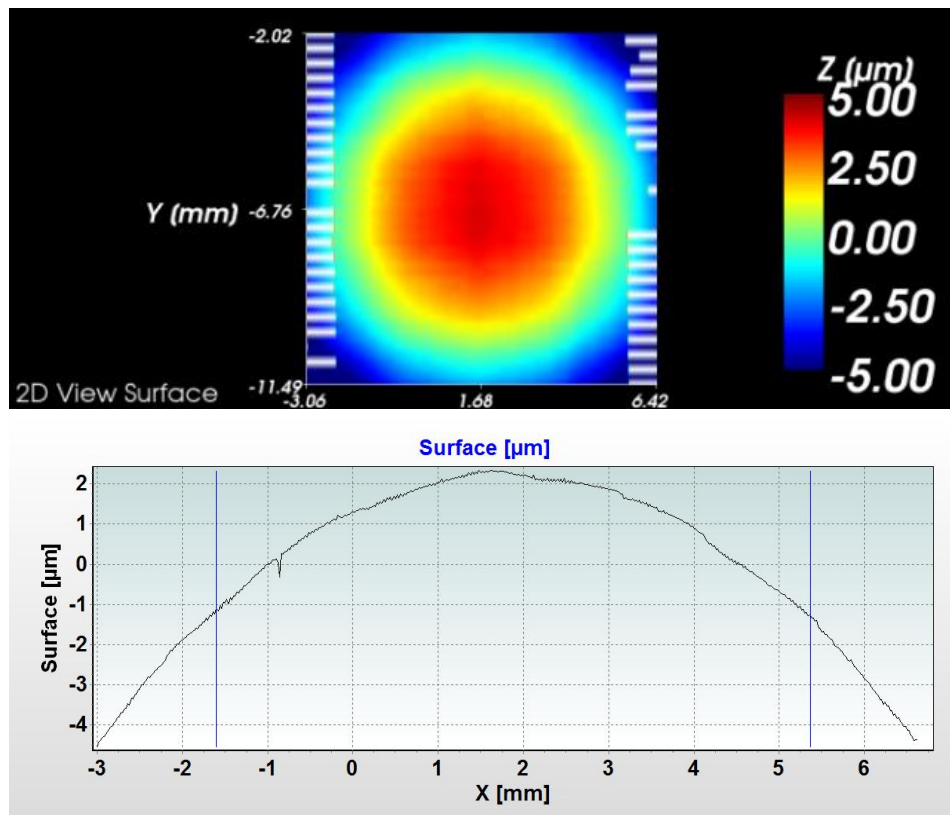


Abbildung 8: Verbiegung eines mit Epotek H20E aufgeklebten Si-Chips –ca. 7  $\mu\text{m}$  von Chip-Mitte bis zum Rand, oben: Messbild des optischen Profilers ISIS, unten: Messwertelinie durch die Chipmitte

Ein Vergleich von verschiedenen Klebern (Tabelle 4) zeigt deren Einfluss auf die Deckelverformung. Folgen der hohen Materialspannungen können Brüche im Die oder im Lötrahmen sein, die zum Bauteilversagen führen.

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Kleber in ihrer Durchbiegung eines Si-Chips

Klebertyp	Härteeinstufung	Durchbiegung
Epotek H20E	Hart	7,0 $\mu\text{m}$
Epotek EV2118	Mittel	1,8 $\mu\text{m}$
TB122B5	Weich	0,6 $\mu\text{m}$

### Drahtbondverbindungen

Die Zuverlässigkeit von Bondverbindungen wird in der Literatur häufig untersucht [41] [42], da diese eine klassische Ausfallursache von mikroelektronischen Produkten sind. Die Zuverlässigkeit von Au-Al Drahtverbindungen wurde in [43] untersucht. Hierbei können spröde intermetallische Verbindungen und Kirkendall-Poren auf Grund unterschiedlicher Diffusionseigenschaften die Bondstärke verringern [44].

Die Zuverlässigkeit von Drahtbondverbindungen für Hochtemperaturanwendungen und Anwendungen höchster Zuverlässigkeit wurde vom Fraunhofer IMS in [13] untersucht (siehe Abbildung 9). Die Zugfestigkeit der Palladiumdrähte hat von Anfang an höhere Werte und bleibt im Gegensatz zu Au-Drähten konstanter. Die Scherfestigkeit bleibt in beiden Fällen über 2500 h bei 250 °C konstant und stellt somit kein zuverlässigkeitsrelevantes Problem dar.

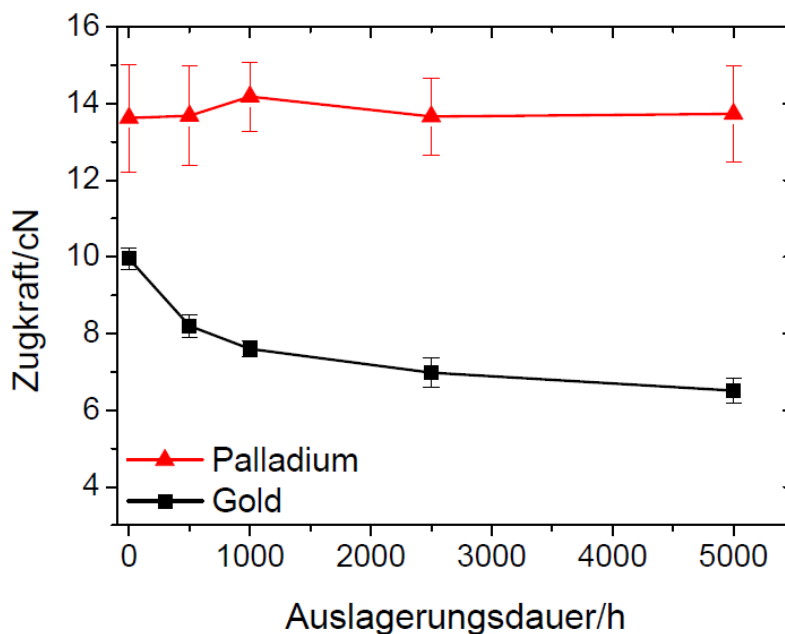


Abbildung 9: Zugfestigkeit von Palladium- und Gold-Drahtbonds für Hochtemperaturanwendungen bei einer Auslagerung bei 250 °C [13]

## ASIC

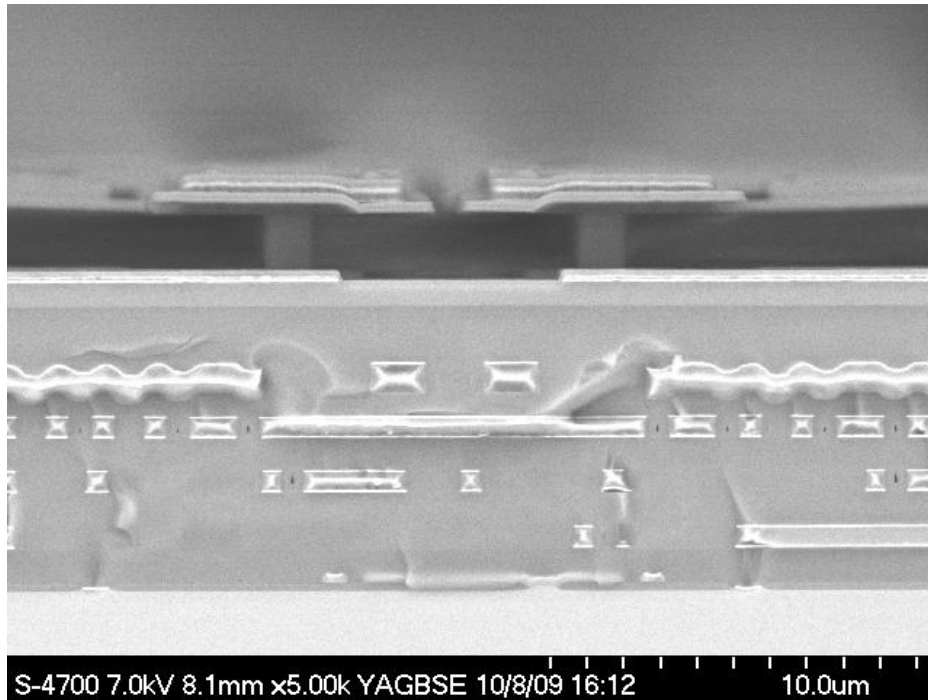


Abbildung 10: Bolometer auf der ROIC Schaltung im Querschnitt [12]

Der ASIC (application-specific integrated circuit) ist bei Infrarotsensoren eine auf CMOS-Basis prozessierte Ausleseschaltung der Bolometer (siehe Abbildung 10). Die Zuverlässigkeiten von Halbleiterschaltungen werden seit Jahrzehnten untersucht, sind Stand der Technik, werden immer weiter optimiert und weisen damit eine hohe potentielle Zuverlässigkeit auf. Beim Fraunhofer IMS z. B. ist der CMOS-Prozess gesondert nach dem AEC-Q100 Standard für automobiler Anwendungen und der JEDEC-Norm „Foundry Process Qualification Guidelines“ JP-001 geprüft und qualifiziert. Hierbei wurden spezielle Zuverlässigkeitsprüfungen durchgeführt und die folgenden Fehlermechanismen analysiert und optimiert:

### Zuverlässigkeitsprüfungen im Halbleiterprozess Fraunhofer IMS:

1. Elektromigration
2. Stress-Migration
3. Inter/Intra Metal-Dielectric Reliability
4. DC Hot Carrier Injection

5. Negative Bias Temperature Instability
6. Voltage Ramp Dielectric Breakdown
7. Time-Dependent Dielectric Breakdown
8. Plasma Process Induced Damage
9. Ionic Contamination / Bias Temperature Stress
10. E2PROM Data Endurance / Retention Test
11. Process Control Monitor
12. Construction Analysis
13. Bondpad Qualification

Daher besitzt der ASIC bereits eine sehr hohe Zuverlässigkeit und wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Dies bestätigt auch eine Studie an CMOS-Bildsensoren in [34], bei der die Hauptfehlerquellen die Sensorstrukturen und deren Performance sind. Die Ausleseschaltung spielte nur eine untergeordnete Rolle und zeigte nur Ausfälle bei hoher Strahlenbelastung, die aber keine typische Einsatzbedingung von Infrarotsensoren darstellt.

Der Fokus weiterer Untersuchungen liegt auf dem Package und den Bolometern, welche die spezifischen Technologien von Infrarotsensoren darstellen.

## 4.2 Bolometer

Die Sensorstrukturen der Infrarotsensoren bilden in Arrays angeordnete Mikrobolometer (siehe Abbildung 11), mit typischen Pixelgrößen von 25  $\mu\text{m}$ , 17  $\mu\text{m}$  oder 12  $\mu\text{m}$ . Diese werden in einem Postprozess auf dem ASIC prozessiert. Die untersuchten Bolometer dieser Arbeit basieren auf amorphem Silizium. Die gewonnenen Erkenntnisse können jedoch auch auf andere Sensormaterialien, wie Vanadium-Oxid, übertragen werden.



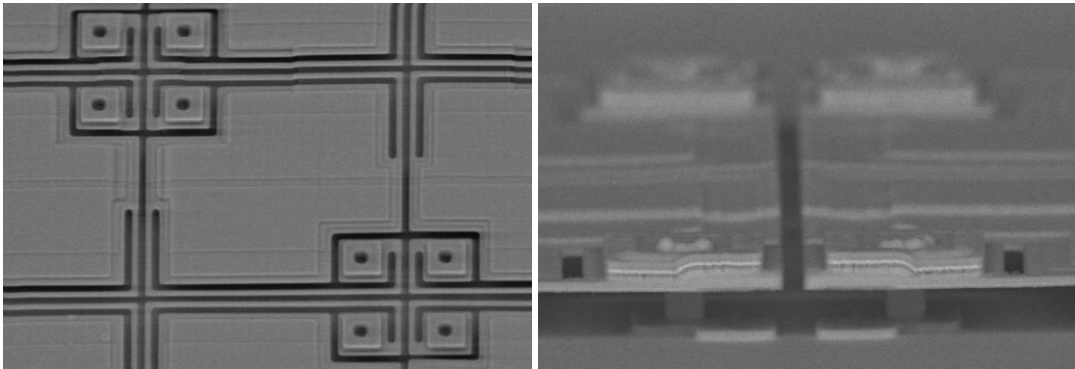


Abbildung 11: SEM Aufnahme eines Bolometer-Array von oben (links) und seitlich (rechts) [12]

### Performance-Kennwerte

Die Sensorperformance wird durch zwei charakteristische Parameter beschrieben ([45], [46] und [47]). Die Responsivität  $R$  (4.2) beschreibt die Empfindlichkeit des Bolometers und besitzt meist die Einheit LSB / K (least significant bit pro Kelvin). Der NETD-Wert (Noise-equivalent temperature difference) (4.1) bezieht zusätzlich zur Responsivität weitere optische Parameter und das Rauschen  $U_n$  mit ein.

$$NETD = \frac{4 \cdot F_Z^2 \cdot U_n}{R \cdot A_B \cdot \phi \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta T}\right)} \quad (4.1)$$

$$R = \frac{TCR \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot U_{Bolo}}{G_{Th} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \quad (4.2)$$

$F_Z$	F-Zahl der Infraroptik
$U_n$	Rauschspannung
$A_B$	Bolometer Pixelfläche
$\phi$	Transmissionsfaktor
$\Delta P / \Delta T$	Temperatur Kontrast
$TCR$	Temperaturkoeffizient des Widerstandes
$\beta$	Bolometer Füllfaktor
$\varepsilon$	Absorbtionsfaktor

$U_{\text{Bolo}}$	Bolometerspannung
$G_{\text{Th}}$	thermische Leitfähigkeit
$\omega$	Bildauslesefrequenz
$\tau$	thermische Zeitkonstante

Entsprechend den Gleichungen (4.1) und (4.2), muss das Sensormaterial einen maximal großen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes (TCR) besitzen, da, dem Sensor-Wandlerprinzip aus Abbildung 4 entsprechend, die thermische Energie in einer möglichst großen Änderung des elektrischen Widerstandes resultieren soll. Des Weiteren werden Bolometer als aufgehängte Membranen realisiert (siehe Abbildung 11 rechts), in dem ein dünnes Stützgerüst entwickelt wird, das zum einen mechanisch stabilisierend aber auch thermisch isolierend wirkt. Für eine hohe thermische Isolation müssen die Bolometerstege möglichst lang und dünn sein und aus einem Material mit einer sehr kleinen thermischen Leitfähigkeit bestehen. Dieses Ziel steht aber oft in Konflikt mit der Anforderung an eine hohe mechanische Stabilität. Gerade wenn Bolometer mit neuen Herstellungsverfahren kleiner oder dünner werden, muss auch die mechanische Stabilität und damit Zuverlässigkeit gewährleistet werden.

#### Fehlermöglichkeiten für Bolometer

Eine Veränderung des NETD-Wertes und der Responsivität ist für die Applikation kritisch, da dadurch das Auflösungsvermögen der Kamera sinkt. Dabei kann die Performance aller Bolometer und damit die des Sensors sinken, wodurch Messfehler beim Kunden entstehen. Es können sich aber auch einzelne Bolometer verändern oder ganz ausfallen und einen defekten Pixel bilden. Entstehen diese während der Lebenszeit, bilden sie einen negativen nicht akzeptablen Bildeindruck.

#### Degradation der Sensorperformance

Die Gleichungen (4.1) und (4.2) werden in Tabelle 5 auf Parameter überprüft, die sich über eine Alterung verändern können.

Tabelle 5: degradationsrelevante Parameter der Bolometer-Performance

Parameter	Formelzeichen	Tendenz für Performanceverlust
Rauschspannung	$U_n$	Steigt $\uparrow$
Temperaturkoeffizient	$TCR$	Sinkt $\downarrow$
Transmission des Deckels	$\phi$	Sinkt $\downarrow$
thermische Leitfähigkeit	$G_{Th}$	Steigt $\uparrow$

Wird das Rauschen größer oder die Transmission des Deckels geringer, wird entsprechend auch der NETD Wert größer. Wenn der TCR Wert, also die thermische Empfindlichkeit des Sensormaterials, sinkt oder sich die thermische Leitfähigkeit erhöht, sinkt die Responsivität der Infrarotsensoren.

Die thermische Isolation wird detailliert im Kapitel 4.3.2 betrachtet und ist abhängig vom Bolometerstegdesign und vom Innendruck des Package. Da sich das Stegdesign über eine Alterung nicht verändern wird, muss sich die thermische Isolation durch das Vakuum im Package verändern.

Im Weiteren werden die potentiellen Fehlermechanismen für Bolometer theoretisch betrachtet und physikalische Ursachen untersucht. Ausgenommen ist hierbei die Deckeltransmission, da hier keine potentiellen Fehlermechanismen bekannt sind. Im Kapitel 5 sind dagegen die experimentellen Ergebnisse zu diesen Fehlermechanismen beschrieben. Dabei wurden Versuche an IRFPAs und Teststrukturen durchgeführt, um das Degradationsverhalten dieser vier Parameter gezielt zu untersuchen.

#### 4.2.1 Elektromigration

Ein zusätzlicher Fehlermechanismus, der die Funktion der Bolometer einschränken bis zerstören kann, sind Elektromigrationseffekte.

Elektromigration ([48], [49]) beschreibt einen Materialtransport in einem festen Leiter. Hervorgerufen wird dieser durch Kollisionen von Elektronen und Ionen sowie durch elektrische Felder, die wiederum Kräfte auf Ionen wirken, welche durch Diffusionsprozesse in eine bevorzugt Richtung wandern. Dieser Effekt wirkt umso stärker je kleiner die Strukturen sind, da sich hierdurch die Stromdichte erhöht. Mögliche Folgen sind die Bildung von Löchern oder Hügel, die dadurch andere Schichten beschädigen und zum Kurzschluss oder zur Unterbrechung führen können. Dieser Fehlermechanismus bewirkt Schäden über die Zeit und ist damit ein Degradationseffekt, der zur Zerstörung von Leiterbahnen führt, siehe Abbildung 12.

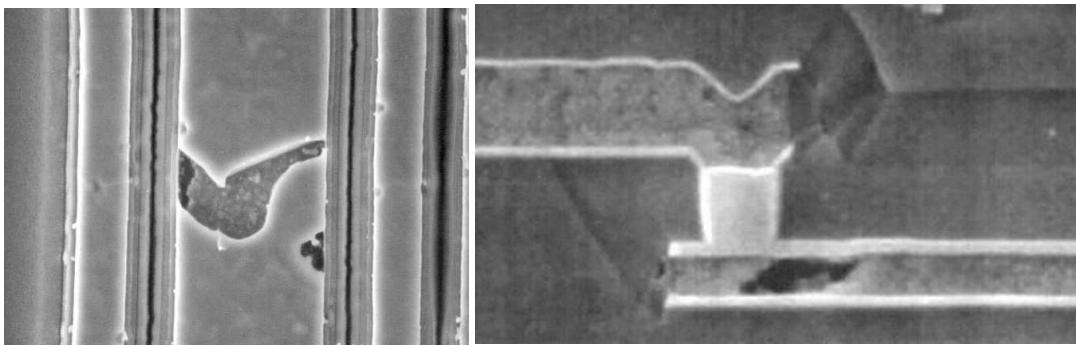


Abbildung 12: beispielhafte Elektromigrationsschäden an Leitbahnen nach [50], links: Aluminium Leitbahnen, rechts: Querschnitt einer Via-Verbindung

Nach Untersuchung in [51] führten Stromdichten von ca.  $10^7$  A/m<sup>2</sup> und in [52] bei  $10^{10}$  A/m<sup>2</sup> zu Elektromigrationsschäden. Elektromigration kann auch bei Infrarotsensoren einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit haben. Die elektrischen Ströme, die während der Auslese der Bolometer fließen, sind zwar klein, aber deren Querschnittsfläche ebenso, womit relativ hohe Stromdichten entstehen können. Zudem ist nicht bekannt, welche Empfindlichkeit auf Elektromigration bei diesen dünnen Schichten (< 10 nm) besteht.

Die für diesen Fehlermechanismus kritischsten Strukturen sind die dünnen elektrischen Kontaktstege der Bolometer und Vias. Diese müssen dünn sein, um die thermische Leitfähigkeit klein zu halten. Berechnet man die Stromdichte mit dem Bolometerdesign und den Materialspezifikationen der Bolometer vom

Fraunhofer IMS, so erhält man Größenordnungen im Bereich von  $10^8 \text{ A/m}^2$  und liegt damit in einem potentiell kritischen Bereich.

Untersuchungen nach [53] von Titannitrid mit höheren Schichtdicken um die 100 nm und Stromdichten von  $10^{11} \text{ A/m}^2$ , einer Temperatur von  $340 \text{ °C}$  und 300 h Stresszeit, zeigten keine Widerstandsänderung oder Schäden an den Strukturen. Weiterhin zeigten sich bei hohen Temperaturen keine Schäden durch Elektromigration, sondern lediglich thermische Schäden durch den hohen Temperaturgradienten. Folglich wurde eine voraussichtliche Lebensdauer von mindestens 10 Jahren bestimmt. Die Robustheit gegen Elektromigration wird experimentell im Kapitel 5.1 nachgewiesen.

#### 4.2.2 Rauschen

Unter Rauschen eines bildgebenden Systems wird die zeitliche oder örtliche Variation der Pixelwerte über die Zeit oder Messzyklen verstanden und durch die Standardabweichung charakterisiert. Das Rauschen reduziert die auflösbaren Temperaturunterschiede und begrenzt damit maßgeblich die erreichbare Genauigkeit der Bolometer.

Entscheidender Parameter der Bolometer nach Gleichung (4.1) ist der NETD-Wert, der das mittlere hochfrequente zeitliche Rauschen aller Sensorelemente beinhaltet [54].

Die Berechnung des Rauschens eines Pixels der Koordinaten  $x$  und  $y$  über die Standardabweichung ( $Std$ ) nach Gleichung (4.3) über  $n$  Bilder, erfolgt mit folgender Formel [55]:

$$Std(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{D}(x, y) - D_i(x, y))^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

$D_i(x, y)$  steht bei den Bolometer-Pixeln für den digitalen Wert der gemessenen elektrischen Widerstandsänderung, im  $i$ -ten Frame bei den Koordinaten  $(x, y)$

im Bolometer Array und  $\bar{D}(x, y)$  für den Mittelwert über alle Frames für jedes Pixel.

$$\bar{D}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i(x, y) \quad (4.4)$$

Das Gesamtrauschen  $NETD_R$  (4.5) setzt sich aus den Bestandteilen des  $f^{-1}$ -Rauschens  $NETD_{1/f}$ , dem Rauschen durch die Ausleseschaltung  $NETD_{ROIC}$ , dem Wärmerauschen  $NETD_T$ , und dem Rauschen durch thermische Fluktuationen  $NETD_P$ , das auch als Phononen-Rauschen bezeichnet wird [28], [56], zusammen.

$$NETD_R^2 = NETD_{1/f}^2 + NETD_T^2 + NETD_P^2 + NETD_{ROIC}^2 \quad (4.5)$$

Für die vereinfachte Darstellung werden die folgenden Parameter zu einer Konstanten  $M$  zusammengefasst.

$$M = \frac{4 \cdot F_Z^2 \cdot G_{Th}}{\phi \cdot \frac{\Delta P}{\Delta T} \cdot \beta \cdot A_{Bolo} \cdot \varepsilon} \quad (4.6)$$

$$NETD_{1/f} = M \cdot \frac{\sqrt{\frac{K}{v}} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{x_l \cdot f_i}{f_s}\right)} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \left(\frac{C_{Th}}{G_{Th}}\right)^2}}{TCR} \quad (4.7)$$

$$NETD_T = M \cdot 2 \cdot \sqrt{k} \cdot \frac{\sqrt{T_{Bolo}} \cdot \sqrt{R_{Bolo}} \cdot \sqrt{x_l \cdot f_i} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \left(\frac{C_{Th}}{G_{Th}}\right)^2}}{TCR \cdot U_{Bolo}} \quad (4.8)$$

$$NETD_P = M \cdot \sqrt{k} \cdot \frac{T_{\text{Bolo}}}{\sqrt{C_{\text{Th}}}} \quad (4.9)$$

$$NETD_{\text{ROIC}} = K \cdot \frac{(R_{\text{ROIC}} + R_{\text{Bolo}}) \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \left(\frac{C_{\text{Th}}}{G_{\text{Th}}}\right)^2}}{TCR \cdot U_{\text{Bolo}} \cdot R_{\text{ROIC}}} \cdot V_{\text{ROIC}} \quad (4.10)$$

$$V_{\text{ROIC}} = \sqrt{V_{\text{Amp}} \cdot (x_1 \cdot f_i) + \frac{V_Q^2}{12} + \left(\frac{R_{\text{ROIC}} \cdot R_{\text{Bolo}}}{R_{\text{ROIC}} + R_{\text{Bolo}}}\right)^2 \cdot I_{\text{ROIC}} \cdot (x_1 \cdot f_i)^2} \quad (4.11)$$

$K$	1/f-Konstante des Bolometersensormaterial
$\nu$	Volumen des Bolometersensormaterial
$T_{\text{Bolo}}$	Bolometermembrantemperatur
$R_{\text{Bolo}}$	elektrische Bolometer Widerstand
$\beta$	Bolometer Pixelfüllfaktor
$A_{\text{Bolo}}$	Bolometer Pixelpitch
$\varepsilon$	Infrarot Absorptionsrate der Bolometermembran
$x_1$	Anzahl an Bolometerpixel pro Readout-frame
$f_i$	Bildwiederholungsrate
$f_s$	Shutter-Frequenz des Bolometer Array
$U_{\text{Bolo}}$	Spannung über Bolometer
$R_{\text{ROIC}}$	Eingangsimpedanz des ROIC
$V_{\text{ROIC}}$	Gesamtrauschen des ROIC
$V_{\text{Amp}}$	Eingangsreferenz-Rauschspannung
$V_Q$	Eingangs Referenz ADC Quantisierungsintervall
$I_{\text{ROIC}}$	Rauschstrom vom ROIC Eingang und Bolometerspannungsquelle
$\frac{\Delta P}{\Delta T}$	Temperaturkontrast
$\omega$	Modulationsfrequenz des Infrarotsignals der Bildszene
$k$	Boltzmann-Konstante

Nach [57] und [58] wird die Performance von Bolometern hauptsächlich vom  $f^{-1}$ -Rauschen dominiert, das bei amorphen Kristallstrukturen höher ist als bei

mono- oder polykristallinen. Eigene Messung in Kapitel 5.2.1 bestätigen diese Aussagen.

#### Rauschänderung durch Alterung

Die interessante Frage bei diesen Formeln zur Modellierung des Rauschens ist, bei welchen potentiellen Degradationsparametern aus Tabelle 5 sich das Rauschen verändert. Betrachtet man hierauf die Gleichungen (4.7) bis (4.11), erkennt man, dass das Rauschen steigt, wenn der TCR-Wert kleiner wird und steigt, wenn die thermische Isolation (z. B. durch den gestiegenen Innendruck) sinkt.

Ein weiterer Parameter, der sich durch eine Alterung verändert (siehe Kapitel 5), aber nicht direkt zu einem Performanceverlust nach (4.1) und (4.2) führt, ist eine Veränderung des elektrischen Widerstandes, besonders bei dem Sensormaterial.  $NETD_{ROIC}$  ist unabhängig von einer Widerstandsänderung, da ein geänderter Strom durch einen Abgleich mit der ROIC-internen Offsetspannung ausgeglichen wird, damit ist der Eingangsstrom des ROIC gleich.

Entgegen dem Rauschen durch thermische Fluktuationen ist im Wärmerauschen zwar formell eine Abhängigkeit von dem elektrischen Widerstand, aber mit  $T = P/G_{Th}$ , wird  $NETD_T$  zu (4.12) und ist unabhängig vom elektrischen Widerstand.

$$NETD_T = M \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{k} \cdot \sqrt{x_1 \cdot f_i} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \left(\frac{C}{G_{Th}}\right)^2}}{\sqrt{G_{Th}} \cdot TCR} \quad (4.12)$$

Das Phononen-Rauschen würde mit steigendem Widerstand zwar etwas kleiner werden, allerdings hat dieser Rauschanteil nach [59] aber auch einen vernachlässigbar kleinen Anteil am Gesamt rauschen. Somit sollte das Rauschen mit steigendem Widerstand nicht signifikant ansteigen. Ein Anstieg des Rauschens durch einen verringerten TCR oder erhöhten Package-Innendruck ist zwar the-



oretisch möglich, allerdings konnte hier keine Korrelation diesbezüglich gemessen werden. Ganz im Gegenteil konnte in Kapitel 5.1.1 eine Verringerung des Rauschens über eine thermische Alterung gemessen werden. Eine sinnvolle Erklärung hierfür kann aber mit den hier beschriebenen Modellen nicht gewonnen werden.

### 4.2.3 TCR

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes (TCR) bestimmt maßgeblich die Performance der Bolometer. Es stellt sich die Frage: Welche Prozesse können diesen materialspezifischen Parameter über eine Alterung verringern?

Der TCR ist dabei stark abhängig von dem Fertigungsprozess und den verwendeten Dotierstoffen. Eine besondere Abhängigkeit betrifft dabei den Wasserstoffgehalt des a-Si-Materials [60]. Dabei besitzt amorphes Silizium entgegen poly- oder einkristallinem Silizium viele freie Bindungsstellen, von denen viele durch gezielte Wasserstoffeinlagerung gesättigt werden. Die möglichen Konfigurationen werden in der folgenden Skizze nach Stutzmann [60] gezeigt.

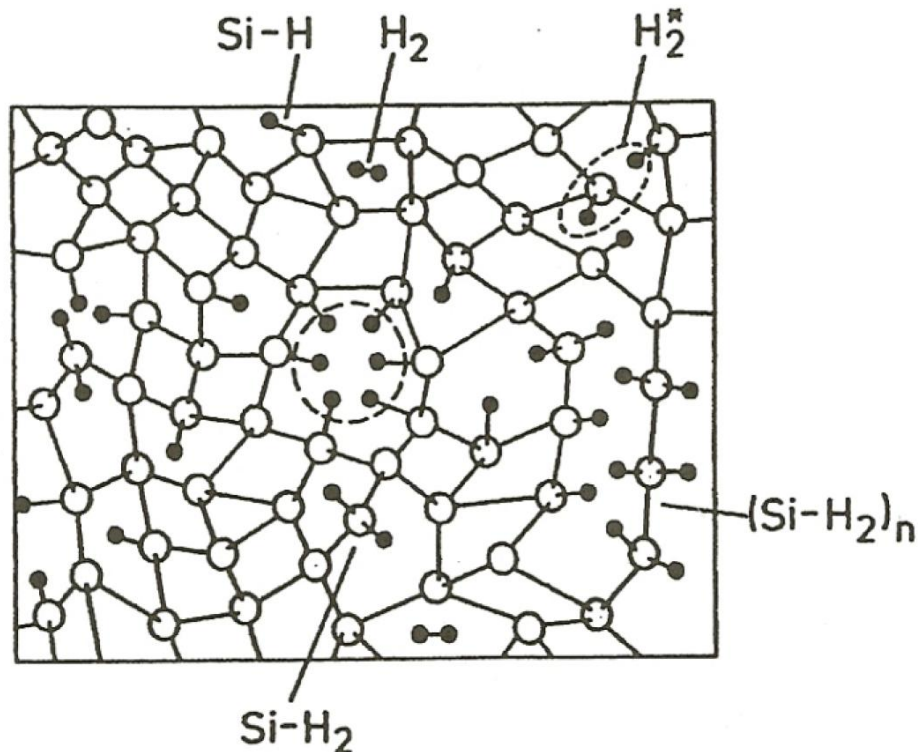


Abbildung 13: Strukturkonfiguration von Wasserstoff in amorphem Silizium [60]

Wasserstoff bindet freie Stellen zu Si-H oder auch Si-H<sub>2</sub>, es fördert Leerstellen (gestrichelter Kreis) und Siliziumpolymerketten (Si-H<sub>2</sub>)<sub>n</sub> oder bildet molekularen Wasserstoff zwischen den Bindungen. Damit bestimmt Wasserstoff das Gefüge der Sensorschicht und damit dessen elektrische Eigenschaften. Wasserstoffeinlagerung während der Schichtabscheidung hat einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von nano- und mikrokristallinen Strukturen im amorphen Silizium [61].

Untersuchungen in [62] zeigen, dass mit steigendem Wasserstoffanteil der TCR der a-Si Schichten steigt und dass die elektrische Leitfähigkeit mit dem TCR im Zusammenhang steht (3.3.3).

$$|TCR| = \left| \frac{d\sigma}{\sigma \cdot dT} \right| = \frac{E_a}{k \cdot T^2} = \frac{1}{T} \cdot \ln(\rho \cdot \sigma_0) \quad (4.13)$$

$\sigma_{el}$  elektrische Leitfähigkeit

$\sigma_0$	Vorfaktor Leitfähigkeit
$\rho$	spezifischer elektrischer Widerstand
$k$	Boltzmann-Konstante
$E_a$	Aktivierungsenergie

Weitere verwandte Forschungen [63] zeigen, dass mit sinkender Dotierstoffkonzentration der elektrische Widerstand steigt und mit steigender Wasserstoffeinlagerung die Aktivierungsenergie und TCR steigen, da die Bandlücke im Halbleiter größer und die strukturelle Unordnung reduziert wird.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse könnte man schlussfolgern, dass über Ausgasungsprozesse der Sensorschicht das Dotierverhältnis im a-Si verändert wird. Dies ist vor allem bei Wasserstoff interessant, da es auf Grund seiner kleinen Größe leicht diffundieren kann. Unter diesen Annahmen müssten nach Gleichung (4.13) die elektrische Leitfähigkeit und der TCR über eine Alterung sinken. Die Untersuchungen in Kapitel 5 bestätigen dieses Verhalten, womit dieser physikalische Vorgang die Veränderung des Widerstandes und des TCR erklären kann. Zudem ist Wasserstoff eines der dominanten ausgasenden Moleküle.

### 4.3 Package

Die weiteren Zuverlässigkeitsuntersuchungen des Package werden anhand des vom Fraunhofer IMS entwickelten Chip-Scale-Packages (CSP) durchgeführt (siehe Abbildung 14), können aber auch auf andere Package-Arten, wie Keramik- (siehe Abbildung 15) oder Metallpackages übertragen werden.

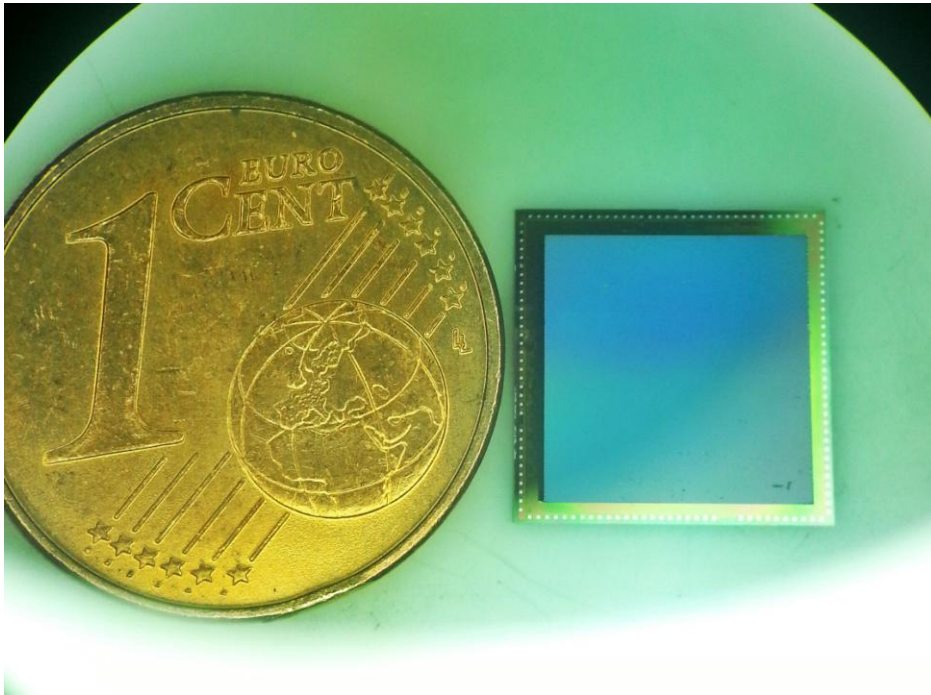


Abbildung 14: Foto QVGA-CSP im Vergleich mit einer 1 Cent Münze

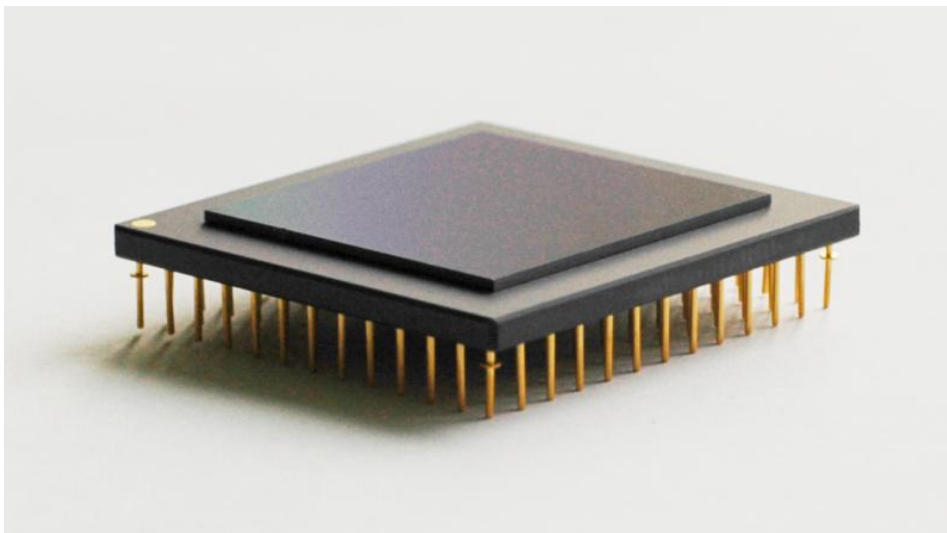


Abbildung 15: Fraunhofer IMS IRFPA im Keramik-Package

### 4.3.1 Aufbau des Chip-Scale-Package

Das CSP besteht aus dem Substrat-Wafer mit den Bolometerstrukturen und dem ROIC. Dieser wird mit einem Deckelchip, über eine eutektische Lötverbindung mit dem Substrat hermetisch dicht verlötet (siehe Abbildung 16). Der Deckel ist infrarotdurchlässig und mit einer Anti-Reflexionsschicht versehen, die die Transmissionseigenschaften maximiert. Zusätzliche Gettermaterialien sind nötig, um den geforderten Innendruck des Packages zu erreichen.

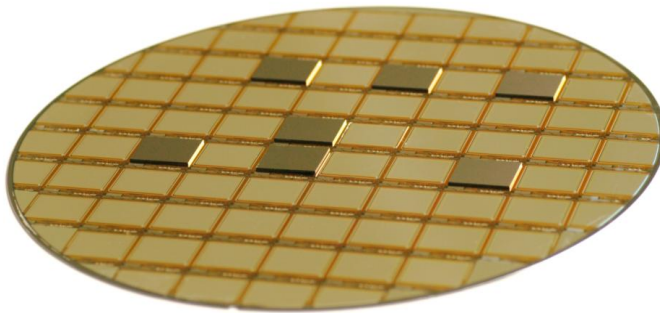


Abbildung 16: CSP-Prozess auf Wafer-Level

Das Package der Bolometer muss hermetisch dicht sein. Das Vakuum muss hierbei die Bolometer thermisch isolieren, um nach Gleichung (4.2) eine maximale Responsivität zu erzeugen. Ein Druckverlust resultiert demnach in einer Verringerung der Sensorperformance und ein Bruch oder Leck des Package in einem totalen Verlust der Empfindlichkeit. Das Package muss demnach mechanisch stabil sein und darf trotz wirkenden Umwelteinflüssen keine Risse oder Schäden aufweisen.

#### Lötrahmen

Der Lötrahmen wird direkt auf dem Wafer abgeschieden und besteht aus mehreren metallischen Schichten. Typischer Weise werden Lötverbindungen aus Kupfer / Zinn (Cu-Sn, [27]) oder Gold / Zinn (Au-Sn) verwendet. Au-Sn Verbindungen werden vor allem in Anwendungen mit hohen Temperaturen und hoher Zuverlässigkeit genutzt [64]. Ihr Vorteil für hermetische Packages besteht darin,

dass sie flussfrei sind und daher geringe Ausgasungen während des Lötvorgangs aufweisen.

Eutektische Au-Sn (Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub>) Legierungen haben einen eindeutigen Schmelzpunkt [65], der niedriger ist, als der der einzelnen Bestandteile. Hierbei muss das Mischungsverhältnis stimmen, damit alle Bestandteile gleichzeitig erstarren und ein feinkristallines und gleichmäßiges Gefüge entsteht. Auf Grund des hohen Schmelzpunktes, der hohen Festigkeit, Resistenz gegen thermische Ermüdung, Flussmittelfreiheit, dem geringen Kriechverhalten und der hohen Korrosionsbeständigkeit, gilt das Eutektikum als Lötverbindung höchster Qualität und Zuverlässigkeit [66] [67]. Eine bekannte Schwachstelle dieser Verbindung ist die Schnittstelle zwischen Lotmaterial und Substrat [66], bei der es zu Rissbildungen und damit zur Zerstörung des Packages kommen kann. Weiterhin können auch Risse in der Passivierung neben dem Lötrahmen entstehen. In [14] wurden Passivierungsrisse außen neben Lötbumps gezeigt, die durch thermische Zyklen entstanden sind. Diese beiden Fehlermechanismen konnten auch in dieser Arbeit festgestellt werden.

#### Solid-Liquid Interdiffusion (SLID)

Das Verfahren zur Herstellung des Lötrahmens aus Cu-Sn oder Au-Sn nennt sich Solid-Liquid Interdiffusion (SLID) [13]. Der gleiche Rahmen wird entsprechend auch auf dem Deckel prozessiert. Der Prozess erfolgt zwischen 300 und 350 °C, wobei Cu bzw. Au in Sn diffundiert und eine Verbindung mit einem Schmelzpunkt über 500 °C erzeugt. Beim Au-SLID weicht man vom eutektischen Punkt ab und durchläuft verschiedene intermetallische Phasen.

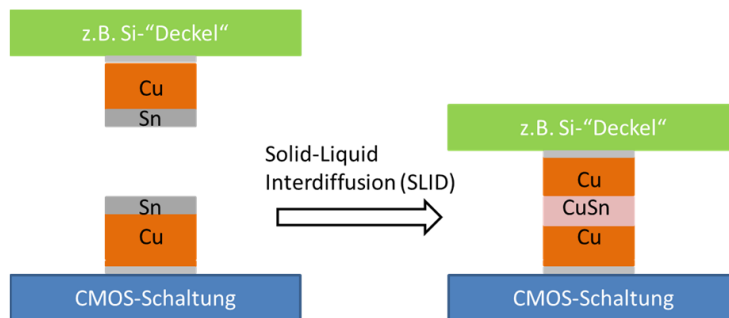


Abbildung 17: SLID Verfahren am Beispiel einer Cu/Sn Verbindung [13]

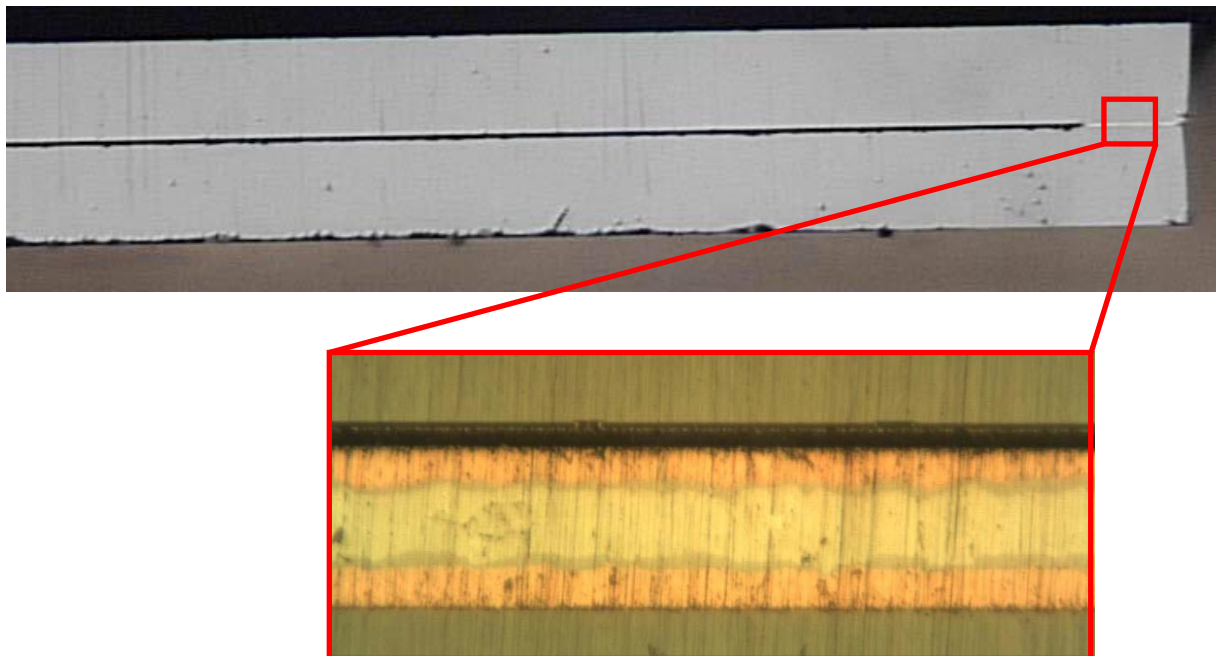


Abbildung 18: CSP im Querschnitt (oben) und vergrößerter Ausschnitt der Lötverbindung (unten) [13]

Laut Studien der IPC [68] sind die Hauptfehlerquellen bei Lötverbindungen, Materialkriechen und mechanische Ermüdung durch Spannungsrelaxation. Fehler summieren sich mit jedem Belastungszyklus auf, da die Verformungen nicht nur rein elastischer Natur sind. Die Zugfestigkeit von Lötverbindungen ist hierbei abhängig von der Temperatur, der Lastwechselrate, dem Lötmaterial und der Korngröße.

### Kristallphasenbildung und Zuverlässigkeit

Die Kristallphasen, die während des Prozesses oder im Betrieb (Lebensdauer) gebildet werden, haben einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit [69].

Eigenschaften, die Einfluss auf die Zuverlässigkeit haben sind:

- thermischer Ausdehnungskoeffizient (CTE)
- Sprödigkeit
- elastische / plastische Verformbarkeit
- Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit

Wichtig bei Eutektika sind die herrschenden intermetallischen Phasen. Beispielsweise besteht das goldreiche Au-Sn Eutektikum aus der  $\zeta$ -Phase  $\text{Au}_5\text{Sn}$  und der  $\delta$ -Phase  $\text{AuSn}$ . Die  $\zeta$ -Phase besitzt das geringste E- und G-Modul und die geringste Vicker's Härte der goldreichen Verbindungen [70] und hat demzufolge das größte Potential aller Phasen, thermomechanische Kräfte zu absorbieren sowie die höchste Zuverlässigkeit. Dem entgegen ist die  $\delta$ -Phase laut [71] spröde und besitzt eine geringere Eigenschaft Spannung bei plastischer Verformung abzubauen.

#### 4.3.2 Modellierung der thermischen Isolation

Da die Responsivität des IRFPAs von der thermischen Isolation der Bolometer abhängt, wird diese näher betrachtet.

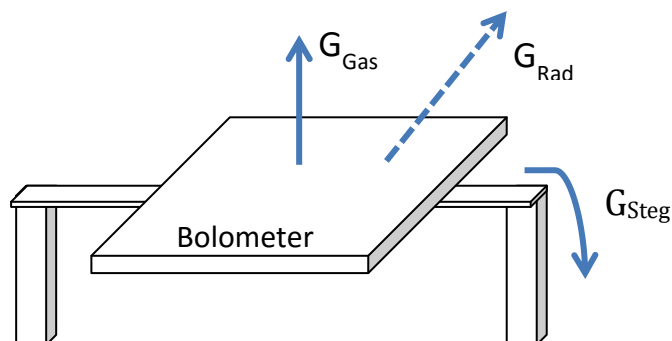


Abbildung 19: Skizze der drei Arten von thermischen Leitfähigkeiten für Bolometer



$$G_{\text{Th}} = G_{\text{Gas}} + G_{\text{Steg}} + G_{\text{Rad}} \quad (4.14)$$

Es gibt drei Typen der thermischen Leitfähigkeit (Abbildung 19), die zur Gesamtleitfähigkeit  $G_{\text{Th}}$  führen. Wärme kann über die Bolometerstege ( $G_{\text{Steg}}$ ), über thermische Strahlung ( $G_{\text{Rad}}$ ) und über Gaskonduktion ( $G_{\text{Gas}}$ ) verloren gehen.

### $G_{\text{Steg}}$

Die Berechnung der Wärmeleitung über die Stege erfolgt nach dem Fourierschen Gesetz (4.14) und ist definiert durch das geometrische Stegdesign, mit der Fläche  $A$ , der Steglänge  $l$  und der materialspezifischen thermischen Leitfähigkeit  $\lambda_m$  der verschiedenen technologischen Schichten.

$$\vec{q} = -\lambda_m \nabla T \quad (4.15)$$

$$G_{\text{Steg}} = \lambda_m \cdot A/l \quad (4.16)$$

Die spezifischen Leitfähigkeiten betragen für typische Materialien wie Titan 21,9 W/K m und Siliziumnitrid 3,2 W/K [28].

### $G_{\text{Rad}}$

Der Wärmeverlust durch thermische Strahlung berechnet sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (4.17). Die typischen Leitfähigkeiten, die sich für 17  $\mu\text{m}$  Bolometer hieraus berechnen lassen, liegen in einem typischen Bereich von  $10^{-9}$  W/K. Diese sind damit zwar klein, da aber die Stege, wie sie vom Fraunhofer IMS gefertigt werden, in einer vergleichbaren Größenordnung liegen, kann dieser Effekt nicht vernachlässigt werden.

$$\dot{Q}_{\text{Rad}} = \sigma \cdot \varepsilon_k \cdot A \cdot (T_{\text{Bolo}}^4 - T_{\text{S}}^4) \quad (4.17)$$

$$G_{\text{Rad}} = 2 \cdot \dot{Q}_{\text{Rad}} / (T_{\text{Bolo}} - T_{\text{S}}) \quad (4.18)$$

---

$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante = $5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
$\varepsilon_k$	materialspezifischer Emissionskoeffizient
$T_{\text{Bolo}}$	Bolometermembrantemperatur
$T_{\text{S}}$	Temperatur des IRFPA Substrat

### $G_{\text{Gas}}$

Die Wärmeleitung erfolgt über Gaskonduktion und basiert auf dem Prinzip der molekularen Strömung. Bei dieser ist die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle deutlich größer als der Durchmesser der Strömung. Dies kann nachgewiesen werden, indem die Knudsen-Zahl berechnet wird, bei der man bei in einem Druckbereich von  $10^{-3}$  mbar Werte im Bereich von  $10^6$  erhält. Bei Knudsen-Zahlen größer 10 verlässt das Gas den Bereich der viskosen Strömung, das Fouriersche Gesetz wird ungültig [72], [73] und die Gaskonvektion wird bedeutungslos. Untersuchungen in [74], [75], [76] zeigten ein vereinfachtes aber effektives Berechnungsmodell, das eine Erweiterung des Fourierschen Gesetzes darstellt. Mit diesem Modell wird die thermische Leitfähigkeit zwischen Bolometer und dem Deckel wie auch Substrat mit (4.19) bis (4.24) beschrieben.

$$G_{\text{Gas}} = \lambda_{\text{Gas}} \cdot A / D \quad (4.19)$$

$$q_{\text{Gas}} = -\lambda_{\text{Gas}} \cdot \Delta T / D \quad (4.20)$$

$$\lambda_{\text{Gas}} = \frac{\lambda_{\text{Substrat}}}{1 + \frac{4L}{3D}} \quad (4.21)$$

$$\lambda_{\text{Substrat}} = \frac{1}{3} n \bar{v} c L \quad (4.22)$$

$$n = \frac{p_{\text{G}}}{k_{\text{B}} T_1} \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8 k_{\text{B}} T_1}{\pi m_{\text{M}}}} \quad c = \frac{3}{2} k_{\text{B}} \quad (4.23)$$

$$L = \frac{k_B \cdot T_1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot p_G} \quad (4.24)$$

$\lambda$	thermische Leitfähigkeit
$L$	mittlere freie Wegstrecke
$\bar{v}$	mittlere molekulare Geschwindigkeit
$c$	spezifische Wärme pro Molekül
$k_B$	Boltzmann-Konstante = $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K)
$m_M$	Molekülmasse
$\delta$	Moleküldurchmesser
$D$	Abstand der Wände für Gasaustausch
$p_G$	Gasdruck im Package

Für diese Berechnung ist es notwendig, die Art des Gasgemischs und der Moleküle im Package zu kennen. Die Berechnung der thermischen Leitfähigkeit durch die Gasmoleküle  $G_{\text{Gas}}$  muss für die Wärmeübertragung vom Bolometer zum Substrat  $G_{\text{Gas } 1}$  und vom Bolometer zum Deckel  $G_{\text{Gas } 2}$  durchgeführt werden. Die Berechnung erfolgt hierbei für Wasserstoffmoleküle und den spezifischen Designparametern der QVGA IRFPAs vom Fraunhofer IMS.

$m_H$	Molekülmasse Wasserstoff = 1.00794 u = $1,00794 \cdot 1,660538921 \cdot 10^{-27}$ kg
$\delta_H$	Moleküldurchmesser = 62 pm

$$G_{\text{Gas } 1}(p = 10^{-4} \dots 1 \text{ mbar}) = 4.6 \cdot 10^{-10} \dots 4.6 \cdot 10^{-6} \text{ W/K}$$

$$G_{\text{Gas } 2}(p = 10^{-4} \dots 1 \text{ mbar}) = 4.6 \cdot 10^{-12} \dots 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/K}$$

Damit ist die Wärmeübertragung zwischen Bolometer und Substrat die dominierende Komponente.

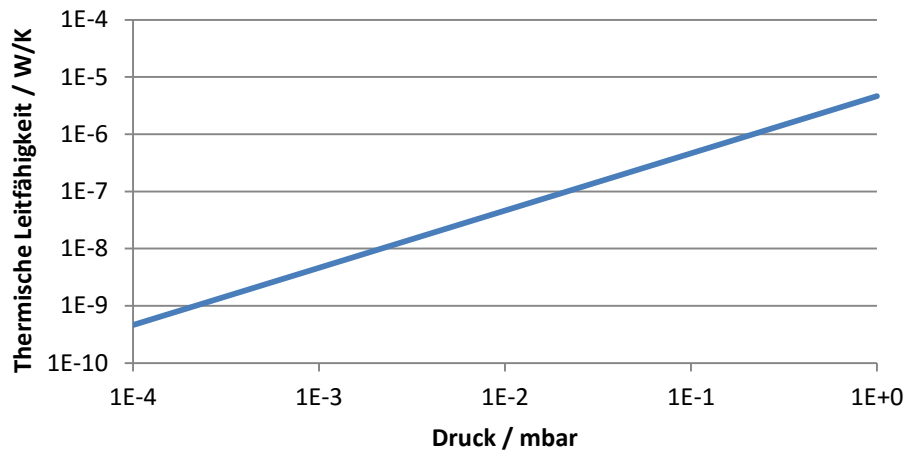


Abbildung 20: Funktion der thermischen Leitfähigkeit der Gase über den Innenruck des Package

Vergleich typischer Größenordnungen der thermischen Isolation:

$$G_{Gas}(P = 10^{-4} \dots 1 \text{ mbar}) = 10^{-10} \dots 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$G_{Steg} = 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

$$G_{Rad} = 10^{-9} \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Auf Grundlage der Bolometer des Fraunhofer IMS wurden die Anteile der thermischen Isolation exemplarisch berechnet, um so typische Größenordnungen auf zu zeigen. Liegt der Innendruck in einem Bereich von  $10^{-3}$  mbar, wird die Wärmeleitung durch Gase klein und verliert ihren Einfluss auf die Gesamtleitfähigkeit. Bei steigendem Innendruck steigt deren Anteil nahezu linear an und wird schnell zum dominanten Faktor. Die Folge ist nach Gleichung (4.2) eine sinkende Responsivität.

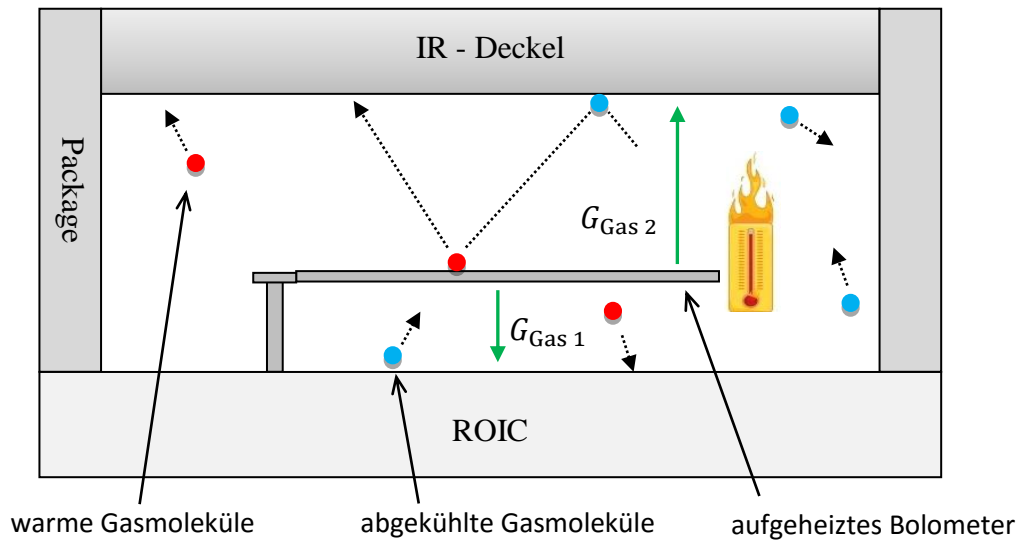


Abbildung 21: Vereinfachtes Beschreibungsmodell der molekularen Wärmeübertragung

Der in Abbildung 21 skizzierte Effekt der Wärmeleitung beschreibt den Wärmeaustausch zwischen der aufgeheizten Bolometermembran und dem kühleren Package. Die sich bewegenden Gasmoleküle nehmen bei Kontakt mit der Membran thermische Energie auf und geben sie an die Innenwände des Packages oder das Substrat wieder ab. Folglich führte eine hohe Anzahl an Molekülen auch zu einer stärkeren Abkühlung des Bolometers. Das Problem ist, dass sich die Anzahl der Moleküle über eine Alterung erhöhen kann und damit folglich die Performance des Infrarotsensors sinkt. Dieser Degradationseffekt wird ausführlich im nächsten Kapitel beschrieben.

### 4.3.3 Vakuumlebensdauer

IRFPAs brauchen wie andere MEMS auch ein hermetisches Package mit einem Innendruck unter  $10^{-2}$  mbar ([77], [29] und [78]), da ein steigender Innendruck direkt zu einer Performanceverschlechterung führt. Physikalische Gründe für diesen Druckanstieg sind vor allem Ausgasprozesse innerhalb des

Packages. Dies ist besonders kritisch für kleine Kavitätswolumen ( $\leq 1 \text{ mL}$ ) wie es der Infrarotsensor aufweist, da hier bereits kleine Gasmengen zu einem starken Anstieg des Innendrucks führen ([79], [80] und [81]).

Der Gasdruck wird nach der kinetischen Gastheorie der Thermodynamik für den vereinfachten Spezialfall eines idealen Gases berechnet nach (4.25), wobei  $R_{\text{Gas}}$  die universelle Gaskonstante und  $n_{\text{Gas}}$  die Anzahl der Moleküle im Package-Volumen  $V$ , bei der Temperatur  $T$  ist.

$$p = \frac{n_{\text{Gas}} \cdot R_{\text{Gas}} \cdot T}{V} \quad (4.25)$$

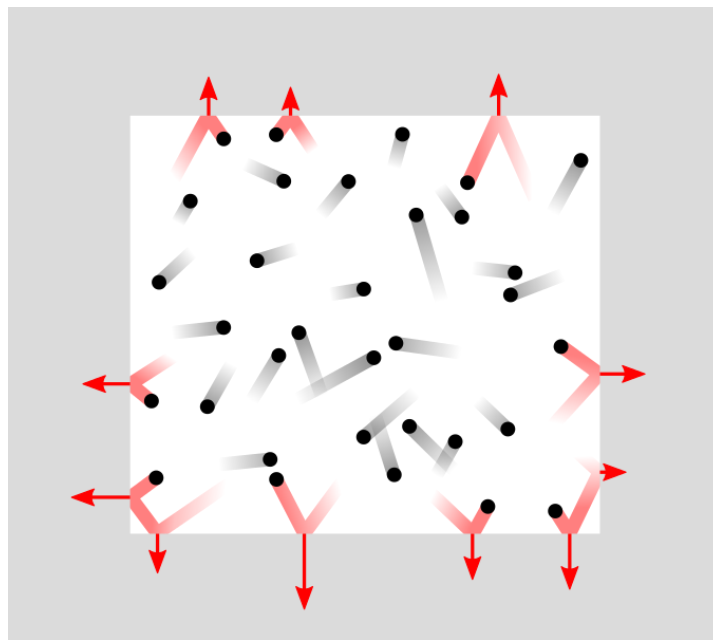


Abbildung 22: Gasdruck durch Moleküle, die mit der inneren Wand des Packages zusammenstoßen, Kräfte sind in Rot dargestellt, der Druck resultiert aus der Summe der Kollisionskräfte [82] auf die Innenwand des Package

Berechnet wird die Änderung des Innendrucks  $\Delta p$  pro Zeiteinheit  $dt$  in einem Kavitätswolumen  $V$  nach (4.26) [83].

$$\frac{\Delta(p \cdot V)}{dt} = Q_{\text{Leckstrom}} + Q_{\text{Permabilität}} + Q_{\text{Desorption}} - Q_{\text{Adsorption}} \quad (4.26)$$

Hierbei sind die Leckströme (mbar/s) aufgedgliedert in die möglichen physikalischen Ursachen (siehe Abbildung 23). Diese sind Leckströme durch Risse oder Fehlstellen im Package, Permeation der Gase durch das Package und der Desorption von Gasmolekülen aus den Oberflächen im Kavitätvolumen des Package. Der gegenteilige Effekt, also eine Reduzierung des Drucks, erfolgt durch die Absorption von freien Gasen mit Getter-Strukturen im Package.

Für das Ausgasen sind raue und damit große Oberflächen schlecht, da hier viele Gase adsorbiert werden können. Dabei können Gase nicht nur aus den Oberflächen des Packages, sondern auch aus den Bolometern ausdiffundieren, die zwei zusätzliche potentielle Flächen für Ausgasprozesse bieten.

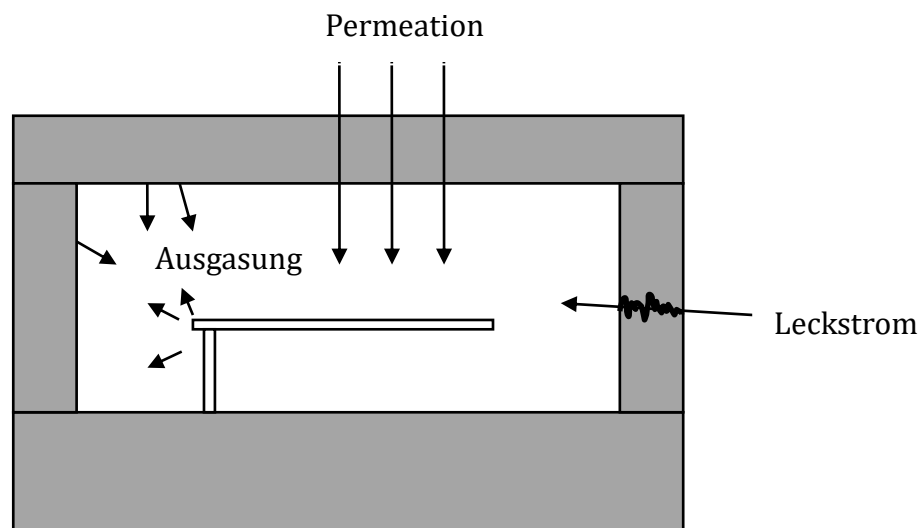


Abbildung 23: Fehlermechanismen die zur Steigerung des Innendrucks im Package führen können

Die Fehlermechanismen aus Abbildung 23 führen zu einer Anreicherung der Kavität mit Molekülen und damit zu einem Druckanstieg, der aber den geforderten Grenzwert ( $10^{-2}$  mbar) nicht übersteigen darf.

### Berechnung des Druckanstiegs im Package

$$Q = F_m \cdot \sqrt{\frac{T}{m_M}} \cdot \Delta p \quad (4.27)$$

$Q$	Gasfluss pro Zeit (Volumen * Druck / Zeit) = Leckrate
$\Delta p$	Durckdifferenz zwischen Package und Umwelt
$F_m$	molekularer Gasfluss (Volumen pro Sekunde)
$T$	Temperatur (K)
$m_M$	molare Masse des Leckgases

$$\Delta p_P = \Delta p_L \cdot \exp\left(\frac{-Q \cdot t}{V \cdot \Delta p_L}\right) \quad (4.28)$$

$\Delta p_L$	Partialdruck des Leckgas
$\Delta p_P$	Druckanstieg im Package

Die Gleichung (4.28) wird zu (4.29) umgestellt, um die Zeit zu berechnen, bis ein spezifischer Druck im Package erreicht ist. Damit benötigt man den Leckstrom  $Q$  um die erreichbare Lebensdauer berechnen zu können.

$$t = -\frac{V}{Q} \left[ \ln \left( 1 - \frac{\Delta p_P}{\Delta p_L} \right) \right] \quad (4.29)$$

Im Folgenden werden die drei physikalischen Ursachen Mikrolecks, Ausgasen und Permeation, die zu einem Druckanstieg im Package führen, analysiert.

#### 1. Mikrolecks

Mikrorisse, Schäden oder Fehlstellen im Material des Packages können zur Ausbildung von Kanälen führen, über die Gase in das Package eindringen. Diese Mikrolecks sind von ihrer Größe durch die kleinstmögliche Molekülgröße begrenzt. Die geringste Leckrate entsteht bei Helium und berechnet sich nach [83] zu ca.  $1 \cdot 10^{-11} \text{ atm cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , für ein QVGA Infrarotsensor mit CSP und einem gewählten Kavitätäsvolumen von  $1,0 \text{ mm}^3$  (1  $\mu\text{l}$ ).



Lecks sind für Infrarotsensoren besonders kritisch, da das Kavitätvolumen sehr klein und die zulässigen Leckraten (Druckerhöhungen) minimal sind. Die Leckrate wird mit (4.30) nach [83] berechnet und wird klassischerweise in atm cc / s (cc = cm<sup>3</sup>, 1 atm = 1,0133 bar) angegeben.

$$Q = -\frac{V}{t} \left[ \ln \left( 1 - \frac{\Delta p_P}{\Delta p_L} \right) \right] \quad (4.30)$$

$$V = 1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$\Delta p_P = 1 \cdot 10^{-6} \text{ atm}$$

$$\Delta p_L = 1 \text{ atm}$$

$$Q(10 \text{ Jahre}) = 3,17 \cdot 10^{-18} \text{ atm cm}^3 / \text{s}$$

$$Q(2 \text{ Jahre}) = 1,59 \cdot 10^{-17} \text{ atm cm}^3 / \text{s}$$

Als Grenze des zulässigen Innendruckes ( $\Delta p_P$ ) wurde hierbei 10<sup>-3</sup> mbar (näherungsweise 10<sup>-6</sup> atm), und als Druckdifferenz zwischen Kavität und Umgebung ( $\Delta p_L$ ) 1 atm gewählt. Die Berechnungen zeigen, dass bei Einhaltung der Dichtigkeitsanforderungen über 10 Jahre, die Leckrate nur 3,17 \* 10<sup>-18</sup> atm cm<sup>3</sup> / s betragen darf. Dieser Wert ist sehr niedrig und kann messtechnisch nicht erfasst werden [84], da die technische Messgrenze bei ca. 10<sup>-12</sup> atm cm<sup>3</sup> / s liegt.

Stellt man die Formel nach der Zeit um und berechnet die Lebensdauer bei der praktisch minimal möglichen Leckrate von 1\*10<sup>-11</sup> atm cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, erhält man eine Haltbarkeit des Packages von 100 s. Folglich sind Mikrolecks bei Infrarotsensoren nicht erlaubt, da sie innerhalb kürzester Zeit zum Ausfall des Bauelements führen würden.

## 2. Ausgasen

Ausgasungen führen zu großen Druckänderungen im Package, die abhängig sind vom Material und dem Herstellungsprozess. Moleküle, die sich auf der Materialoberfläche befinden, können schnell durch Ausheizprozesse beim Package-Prozess entfernt werden. Wasser und andere Gase, die in tieferen Materialschichten lagern, benötigen deutlich mehr Zeit bis sie entfernt sind und gasen daher langsam über einen großen Zeitraum aus [83].

Besonders wirksam sind z. B. Wassereinlagerungen aus Metallisierungs- und Galvanikprozessen [83], wie sie bei Lötrahmen von CSP Prozessen verwendet werden. Besonders bei kleinen Package-Kavitäten führt dies zu großen Druckanstiegen, da hierbei das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis besonders hoch ausfällt.

Das Ausgasen ist stark temperaturabhängig und daher bei Einbrennvorgängen (Burn-In) oder hohen Applikationsbedingungen besonders kritisch. Der Verlauf ist dabei logarithmisch [83] über die Zeit, da sich die verfügbare Gasmenge reduziert und der Partialdruck steigt und somit der Ausgasrate entgegen wirkt.

Einflussfaktoren auf das Ausgasen [79]:

- Thermische Desorption
- Desorption hervorgerufen von Elektronenübergängen
- Materialvaporisation
- Gasdiffusion von Substrat und anschließende Desorption
- Gaspermeation durch Wände

Die Gasmenge hängt dabei von der Leistung der Vakuumpumpe und der Lagerung von Gasmolekülen auf den Oberflächen ab. Die Hauptgase nach [80] sind  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , aber vor allem  $H_2O$ . Besonders kritisch sind Wasserstoffatome, da sie die kleinsten aller Moleküle sind, die geringste Masse und eine hohe Löslichkeit aufweisen und damit schnell in andere Materialien diffundieren. Zudem entsteht Wasserstoff bei vielen chemischen Reaktionen im Herstellungsprozess und lagert sich dabei in Materialien, vor allem Metallen ein.

### Physikalische Ausgasprozesse nach [81]

Die Desorptionsrate hängt ab von der Bindungsenergie der jeweiligen Gase, der Oberflächentemperatur und der Oberflächenbedeckung und ist damit ein temperaturabhängiger Effekt, der mit einer abklingenden Exponentialfunktion beschrieben werden kann.

Bei physischer Adsorption wirken van-der-Waals-Kräfte mit Bindungsenergien ( $E$ ) von unter  $40 \text{ kJ/mol} = 10 \text{ kcal/mol} = 0,4 \text{ eV}$ . Sie wirkt bei niedrigen Temperaturen und Bindungsenergien.

Bei chemischer Adsorption treten chemische Verbindungen zwischen den Gasmolekülen und den Atomen der Oberfläche auf. Die Bindungsenergien befinden sich zwischen  $80 \dots 800 \text{ kJ/mol} = 20 \dots 200 \text{ kcal/mol} = 0,8 \dots 8 \text{ eV}$  und sind mit den benötigten Temperaturen im Bereich von  $340 \dots 450 \text{ °C}$  deutlich höher.

### Ursachen des Ausgasens

Das Ausgasen wurde in [37] bei Gyrosensoren untersucht. Festgestellt wurde, dass das Ausgasen bei Glasdeckeln höher ist als bei Silizium. Über eine Gasanalyse wurde die Zusammensetzung der Kavitätsgase bestimmt, um somit auf die Ursachen der Ausgasung Schlüsse ziehen zu können. Gestützt durch Studien aus [85] und [86] wurden Überreste des Photoresists, organische Ätzmittel und Reinigungsmittel, die nicht vollständig von der Oberfläche gelöst werden, als Ursache des Ausgasens bestimmt.

Savornin et al. haben in [87] per CVD (Chemical Vapor Deposition) Verfahren hergestelltes Siliziumdioxid auf Ausgasungen untersucht (siehe Abbildung 24). Dabei gasen hauptsächlich Wasserstoff, Stickstoff, sowie Kohlenwasserstoffe (Methan und Ethan) und Kohlenstoffdioxid aus.

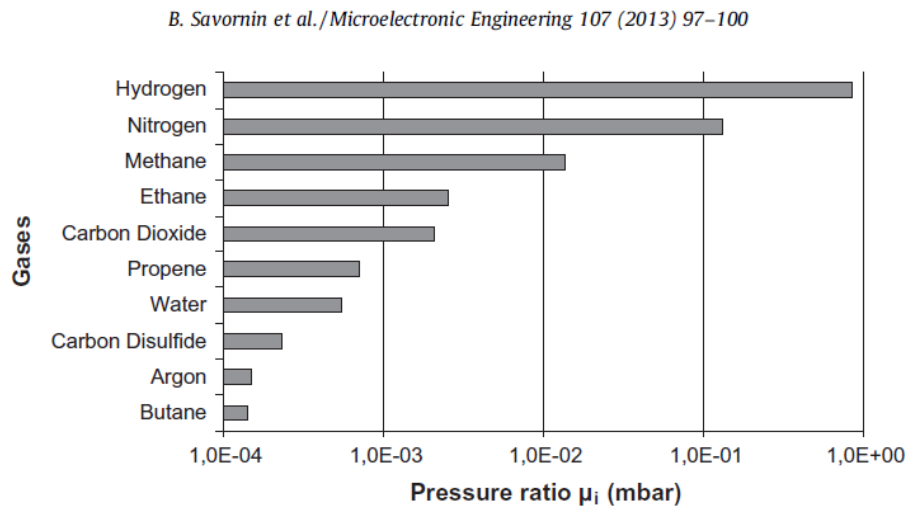
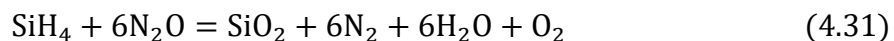


Abbildung 24: Restgasanalyse von CVD Siliziumdioxid nach [87]

Der CVD-Prozess ist ein Grundverfahren der Mikrosystemtechnik und Bolometerherstellung. Über eine Reaktion von Monosilan ( $\text{SiH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) wird Siliziumdioxid nach (4.31) erzeugt. Dabei bilden sich Gase in Form von Stickstoff, Wasser und Sauerstoff [87]. Teile dieser Gase können im Oxid eingeschlossen und damit ausgegast werden. Diese Erklärung des Ausgasens passt zu den in dieser Arbeit ermittelten Untersuchungen und würde darauf hindeuten, dass die Bolometer und das Substrat die Quelle der Ausgasungen sind.



### Gegenmaßnahmen

Das wichtigste und effektivste Verfahren zur Reduzierung der Ausgasprozesse [88], [89] ist ein Vorheizprozess, bei dem das Ausgasen künstlich beschleunigt hergeführt wird, bevor das Package versiegelt wird. Die zweite entscheidende Gegenmaßnahme ist der Einsatz von Getterbeschichtungen nach [90] und [91]. Die Studien in [92] betonen sogar, dass ein Vakuum unter 1 mbar ohne Getter gar nicht erreicht werden kann. Die Getterschicht hat dabei zwei Funktionen. Zum einen dient sie als Diffusionsbarriere für Gase, zweitens haben Gettermaterialien wie Titan und Zirkonium-Verbindungen [26] die Eigenschaft,

Gase zu adsorbieren, wenn sie bei einer spezifischen Temperatur thermisch aktiviert werden. Darüber hinaus können Wasserstoffmoleküle auch bei Raumtemperatur adsorbiert werden. Damit sind Getter ein nützliches Verfahren, um das Ausgasen im Löt- und Bondprozess zu kompensieren.

Getter werden auf dem Wafer strukturiert abgeschieden, so dass sie sich in der Kavität befinden. Bei Infrarotsensoren ist der verfügbare Platz jedoch beschränkt, da der Deckel gleichzeitig Eintrittsfenster für die Infrarotstrahlung und das Substrat größtenteils vom Bolometer-Array bedeckt ist. Die Getter müssen also so designt und prozessiert werden, dass ihre chemische Absorption maximiert und die benötigte Aktivierungstemperatur an den Package-Prozess angepasst ist [26].

Restgasanalysen nach [93] an Siliziumdioxidproben ohne Gettermaterialien (Abbildung 25) zeigen die relevanten ausgasenden Moleküle und ihren Partialdruck. Getter konnten hierbei (Abbildung 27) Wasserstoff, Methan und Stickstoff absorbieren, so dass die Anzahl an Molekülen erheblich reduziert werden konnte.

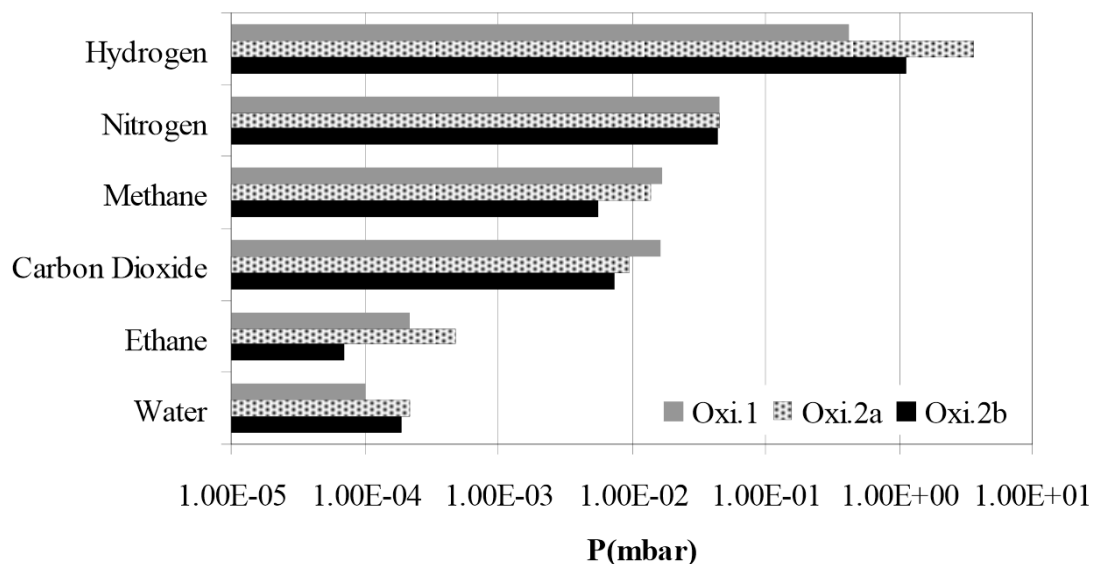


Abbildung 25: Restgasanalysen an Siliziumdioxidproben ohne Getter [93]

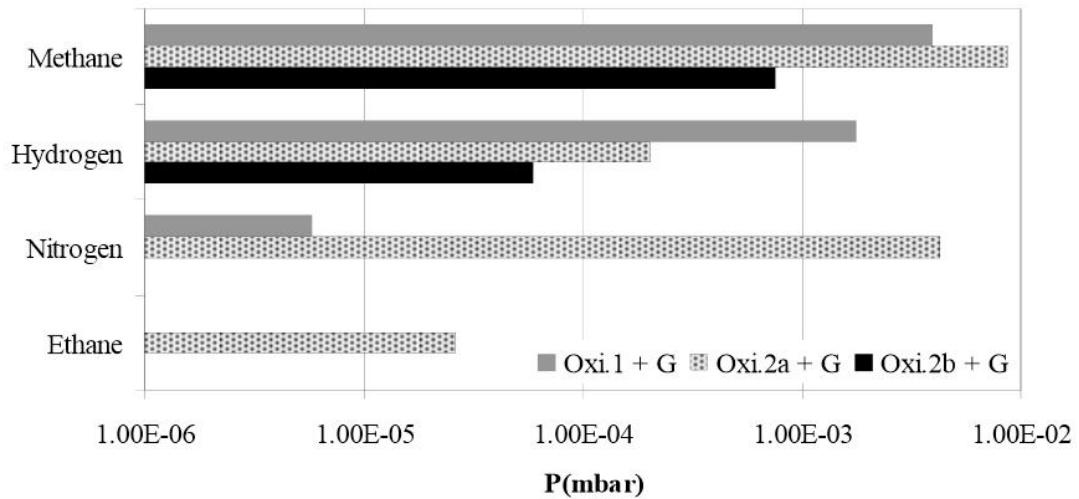


Abbildung 26: Restgasanalysen an Siliziumdioxidproben mit Getter [93]

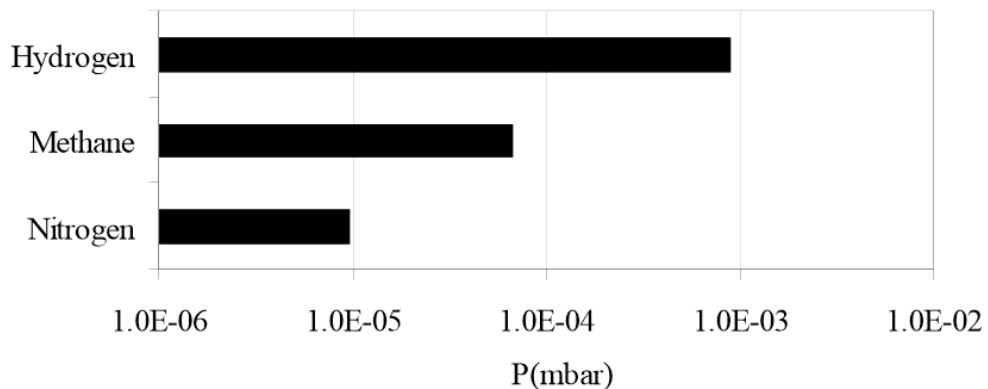


Abbildung 27: Restgasanalyse an vorher aktivierten Gettermaterialien [93]

### **3. Permeation**

Permeation beschreibt einen Diffusionsprozess, bei dem Gase aus der Umgebung durch das Package in das Kavitätvolumen gelangen. Dieser Prozess besteht aus zwei Phasen, der Adsorption von Teilchen auf die Oberfläche und der Diffusion dieser durch den Feststoff hindurch. Die Diffusionsrate durch den Feststoff hängt dabei von dessen (nicht perfektem) Materialgefüge ab. So haben die Porosität des Materials, Lücken zwischen Korngrenzen, die Größe der Korn-

grenzen, Gleitebenen oder andere Materialdefekte einen Einfluss auf die Permeation von Gasen.

Einen weiteren Einfluss hat die chemische Affinität des Gases zu Bindungen, wie bei Wasserstoff oder Sauerstoff, zum Feststoff. Wasserstoff kann durch Metalle und damit durch den Lötrahmen diffundieren, während Edelgase dies nicht können. Durch Halbleiter wie Silizium und Germanium können Helium und Wasserstoff diffundieren [79].

Die Permeationsrate  $Q_P$  (in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) über eine Querschnittsfläche  $A$  und durch eine Wanddicke  $d$  entspricht der Leckrate  $Q_P$  durch die Permeation und berechnet sich über die Permeabilitätskonstante  $P$  nach (4.32).

$$Q_P = \frac{P A \Delta p_L}{d} \quad (4.32)$$

Die Permeabilität verschiedener Gas-Feststoff Kombinationen wird in [83] beschrieben und ist temperaturabhängig, da sich die Poren und Defekte des Feststoffes mit zunehmender Temperatur öffnen und damit durchlässiger für Gas-moleküle werden.

Im Folgenden werden Permeabilitätskoeffizienten ( $K_p$ ) nach [94] angegeben.

- Polymere  $10^{-11} \dots 10^{-17} \text{ m}^2/(\text{s Pa})$
- Glase und Keramiken  $10^{-17} \dots 10^{-19} \text{ m}^2/(\text{s Pa})$
- Metalle und Halbleiter  $10^{-20} \dots 10^{-22} \text{ m}^2/(\text{s Pa})$

Die Kernmaterialien des CSPs von Infrarotsensoren sind Silizium und die Metalle des Lötrahmens. Diese weisen prinzipiell die geringste Gasdurchlässigkeit auf und haben folglich eine hohe Robustheit gegen Permeation.

Der Package-Innendruck in Abhängigkeit der Zeit wird nach [83] berechnet mit (4.33).

$$p_p(t) = \Delta p_L \left( 1 - \exp\left(\frac{-Q_P \cdot t}{\Delta p_L \cdot V}\right) \right) \quad (4.33)$$

Setzt man die Permeationsrate aus Gleichung (4.32) nach [94] in (4.33) ein, erhält man in (4.34) den Druckanstieg im Package in Abhängigkeit der Zeit.

$$p_p(t) = \Delta p_L \left( 1 - \exp\left(\frac{-K_p \cdot A \cdot t}{d \cdot V}\right) \right) \quad (4.34)$$

Für eine einfache Übersichtsrechnung werden die folgenden hypothetischen Parameter für ein QVGA-CSP eingesetzt. Die Berechnung erfolgt hierbei für zwei Siliziumflächen  $p_{p\_Si}$  und den Lötrahmen  $p_{p\_LR}$ .

$A$	Siliziumfläche = 1 cm <sup>2</sup>
$d$	Dicke der Packgewand = 1 Siliziumwafer = 0,75 mm
$V$	Kavitätsvolumen = 1 mm <sup>3</sup>

$$p_{p\_Si} (1 \text{ Jahr}) = 0.042 \text{ pa} = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$$

Ebenfalls berücksichtigt wird der Lötrahmen mit folgenden gewählten Parametern:

$A$	Lötrahmenfläche = 4 * 10 mm * 20 $\mu$ m = 0,2 mm <sup>2</sup>
$d$	Dicke des Lötrahmens = 100 $\mu$ m

$$p_{p\_LR} (1 \text{ Jahr}) = 0.00252 \text{ pa} = 2.52 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$$

Der gesamte Druckanstieg durch Permeation im Package pro Jahr ergibt sich damit näherungsweise zu:

$$p_{\text{Permeation}} = p_{p\_LR} + 2 \cdot p_{p\_Si} = 8.65 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$$

### Fazit

Da wahre Leckströme durch Fehlstellen im Material ausgeschlossen sind und die Permeation einen nur geringen Beitrag zum Druckanstieg liefert, muss das



Ausgasen im Package den Hauptbeitrag liefern. Gestützt wird dies durch Untersuchungen von Savornin in [87] und [93], nachdem der Innendruck hauptsächlich durch das Ausgasen von Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenwasserstoffen verursacht wird. Durch die gesteigerte Molekülzahl im Package verringert sich die thermische Isolation der Bolometer und die Performance der Infrarotsensoren wird über die Zeit schlechter.

#### 4.3.4 Mechanische Fehlermechanismen

Zyklische mechanische Wechselbelastungen von Mikrostrukturen führen zur Degradation von Materialeigenschaften [95] [96]. Mikromechaniken weisen dabei ein anderes Verhalten als Makromechaniken auf. So werden z. B. bei amorphen Mikrostrukturen die Spannungen an der Oberfläche anstatt in Korngrenzen bei Makrostrukturen abgebaut [97]. Die mechanischen Fehlermechanismen, die einen Einfluss auf Infrarotsensoren haben können, sind in Tabelle 6 zusammen gefasst. Die potentiellen Fehlermechanismen wie mechanischer Bruch, Materialermüdung und Delamination werden im Folgenden näher untersucht.

Tabelle 6: potentielle mechanische Fehlermechanismen für IRFPAs

Fehlermechanismus	Einflussfaktor	Fehlermodus
Mechanischer Bruch	Überschreiten der Zugfestigkeit	Bruch von Package, Bonddrähten, Die, Dünnschichten
Materialermüdung	Zyklische Belastung, Rissbildung	Änderung von Materialparametern, Bruch über Zeit / Stresszyklen
Delamination	Kontamination, Oxidation, Scherkräfte, zyklische Belastung	Lösen von Dünnschichten, Zerstörung Löttragflächen

### a) Mechanischer Bruch

Ein mechanischer Bruch ist definiert als Trennung eines einheitlichen Materials in zwei Teile. Die Bruchmechanik befasst sich mit dem Versagen rissbehafteter Bauteile bzw. der Ausbreitung von Rissen unter statischen und dynamischen Belastungen bis zum Bruch.

Bei Infrarotsensoren sind Brüche sowohl im Chip wie auch im Package kritisch, da diese zum sofortigen Ausfall führen können.

#### Arten von mechanischen Brüchen:

- Verformungsbruch: durch plastische Verformungen
- spröder Bruch: entlang Kristallebenen
- interkristalliner Bruch: spröder Bruch entlang Korngrenzen

Alle bruchmechanischen Konzepte haben gemein, dass eine bereits vorhandene Fehlstelle (Riss) im Bauteil vorhanden ist. Diese kann infolge des Herstellprozesses als Lunker, Einschluss, Spannungsriss o. ä. entstanden sein oder erst im Einsatz, z. B. bei zyklischer Beanspruchung, gebildet werden.

Materialbeanspruchungen werden in dieser Arbeit oft mit der Von-Mises-Spannung beschrieben. Diese wird auch Vergleichsspannung oder Gestaltänderungsspannung genannt und überträgt einen realen mehrachsigen Spannungszustand in eine fiktive einachsige Spannung. Damit können räumliche Belastungen mit der Zugfestigkeit der Materialien verglichen werden.

#### Ursachen mechanischer (Mikro-) Risse / Brüche [98]:

- Gitterleerstellen oder zusätzliche Atome  
→ Verringern die Bruchfestigkeit, da sie das Gitter schwächen, führt zu internen Spannungen
- Austausch von Atomen  
→ Auch Einfluss auf Festigkeit aber geringer als Fehlstellen oder Zusätze
- Gitterverschiebungen  
→ Entstehen, wenn elastische Dehnungsgrenzen überstiegen werden
- Präzipitation

→ Ausscheiden eines gelösten Stoffes aus einer übersättigten Lösung, interner Stress Schwächung des Kristallgitters

### **b) Mechanische Ermüdung**

Zyklische Belastungen unterhalb der Bruchgrenzen führen zu Mikrorissen und lokalen plastischen Verformungen. Das Materialgefüge wird dadurch über die Zyklen (Zeit) geschwächt und die kritische Bruchspannung sinkt. Weiterhin können sich Materialeigenschaften wie die Resonanzfrequenz oder der elektrische Widerstand ändern [99].

#### Risswachstum

Risse führen zu einer starken Erhöhung von Spannungen, die nach den Regeln der klassischen Festigkeitslehre sogar unendlich groß sein müssten und damit sofort zum Versagen der Struktur führen. Daher wurde der materialspezifische Spannungsintensitätsfaktor eingeführt, welcher mit der Risszähigkeit verglichen werden kann, um somit Aussagen treffen zu können, ob sich Risse ausbreiten oder es zu einem Bruch kommt.

In realen Bauteilen kommt es auf Grund der Fließgrenze des Materials zu einem Abbau der Spannungen in Form einer plastischen Zone an der Riss Spitze. Solange diese Zone allerdings sehr klein gegenüber der Zone der Spannungsüberhöhung ist, kann mit den Annahmen der linear elastischen Bruchmechanik gearbeitet werden [95]. Grenzwerte, bis wann mit diesen Vereinfachungen gearbeitet werden kann, liefern die entsprechenden ASTM-Normen.

Brown et al. [95] zeigen, dass die Ermüdungsdegradation von Siliziumschichten vom Risswachstum in feuchten Umgebungen verursacht wird. Demzufolge zeigte auch Muhlenstein et al. [100] mit Gyrosensoren, dass das Risswachstum in Vakuumumgebungen geringer und die Lebensdauer folglich größer ist. Dies könnte Infrarotsensoren begünstigen, da sie zumindest in der Kavität im Vakuum und somit vor Feuchtigkeit geschützt sind.

### c) Delamination

Delamination ist ein Fehlermechanismus, der zu Strukturschäden, zum Verlust von Adhäsionskräften und damit der Oberflächenhaftung führt. Dadurch entstehen weitere Fehler wie Package- oder Diebrüche. Gute Haftungen benötigen „saubere“ Oberflächen, womit Oxidationen und Kontaminationen zu vermeiden sind. Zudem schwächen Fehlstellen, Hohlräume wie Kirkendallporen das Materialgefüge und fördert Delamination, da sie als Keimzellen der Rissausbreitung dienen. Hauptfehlerquellen sind jedoch Temperaturwechsel, die zu Materialspannungen und damit zu Delamination führen können. Die Feuchte hat ebenfalls einen Einfluss, da sie die chemischen Bindungen bei dielektrischen Schichten schwächt und zu hygroskopischem Stress führt.

Die treibenden Kräfte sind die Temperatur, Temperaturwechsel und Feuchtigkeit. Die Fehlerrate kann nach (4.35) berechnet werden. Die Aktivierungsenergien  $E_a$  hat nach [101] bei Temperaturen zwischen 85 °C bis 110 °C einen Wert von 0,56 eV und bei Delaminationsfehlern durch Temperatur- und Feuchtebelastungen nach [102] 0,796 eV und einem m-Parameter von 2,815.

$$\lambda = A(RH)^m \exp\left(\frac{E_a}{k T}\right) \quad (4.35)$$

Mikrotechnologisch hergestellte Schichten weisen an Kontaktflächen hohe Eigenspannungen auf und bilden einen Saum, an dem sich chemische und physikalische Degradationen fokussieren. Diese schleichende Degradation führt zu einer Schwächung von mechanischen Eigenschaften und kann zum Ausfall der Struktur führen. Zudem sind die Kontaktflächen empfindlich für chemische Schäden beim Herstellungsprozess, da jeder Oberflächenfehler der Kontaktstellen Wege und Angriffsstellen für Chemikalien bietet, die die Qualität der Verbindung reduziert und zu Delamination führen kann [103]. Folglich werden hohe Reinheit, Kontaminationsfreiheit, saubere und stabile Prozesse benötigt, um Schichtsysteme hoher Qualität zu erzeugen.

Für den Infrarotsensor sind somit die Verbindungsschichten zwischen Silizium und Lötrahmen gefährdet. Hohe Scherkräfte durch thermomechanische Spannungen sind in den Ecken am Größten [7] und können zu Delamination führen.

#### **4.4 Applikationsprofile**

Ziel der Zuverlässigkeitsprüfungen ist es, die Zuverlässigkeit der Produkte nachzuweisen. Hierfür müssen die Prüfungen auch so gestaltet sein, dass diese die Einsatzbedingungen nachbilden. Daher müssen verschiedene Prüfkonzepte für die unterschiedlichen Einsatzbedingungen generiert werden. Viele Anwendungsgebiete sind nach Kundenwunsch sehr speziell. Bei einer Sensorintegration auf einem Flugmarschkörper oder bei Weltraumapplikationen treten andere Belastungen auf als im Konsumerbereich. Daher müssen Prüfungen immer auf solche speziellen Anforderungen angepasst und durchgeführt werden.

Entscheidend ist hierbei die Bestimmung der Einsatzbedingungen im Anwendungsfall, die meist nur in grober Näherung bekannt sind und starken individuellen Schwankungen unterliegen.

##### Mögliche Stressfaktoren:

- Temperatur
- Elektrische Belastung
- Temperaturwechsel
- Mechanische Belastung
- Feuchtigkeit
- Chemische Belastung

In Tabelle 7 werden typischen Temperaturbelastungen für Infrarotsensoren beschrieben. Ergänzend dazu werden in Tabelle 8 Szenarien mit Vibrationsbelastungen und in Tabelle 9 mit mechanischem Schock beschrieben.

Tabelle 7: Einschätzung thermische Belastungen in potentiellen Applikationsfeldern

Kategorie	Temperatur		Temperaturwechsel			Allgemein	
	T min / °C	T max / °C	$\Delta T$ / °C	Zyklendauer / h	Zyklen pro Jahr	Typ. Einsatzdauer / Jahren	Akzept. Fehler Risiko
Konsumer [68]	0	+60	35	12	365	1-3	1
Konsumer [104]	0	+40					< 1%
Ziviles Flugzeug [68]	-55	+95	20	12	365	20	0,001
Industrie & Fahrzeuginnenraum [68]			20	12	185	10	0,1
			40	12	100		
			60	12	60		
			80	12	20		
Industrie [104] Automotive [104]			-10			5-10 bis 17	<< 1% Ziel 0
			+70				
Militär, Boden und Schiff [68]			+95			10	0,1
			40				
Space [68]			60				
			3				
Militär, Flug-Raumfahrt [68]			bis			10	0,01
			12				
			100				
			365				
			40	2	365		
			60	2	365		
			80	2	365		
			20	1	365		

Tabelle 8: Umweltbelastungen durch Vibrationen [105]

Kategorie	Beschreibung
Landtransport	1 .. 3 Hz bei 29,4 m/s <sup>2</sup> ; 15 .. 40 Hz bei 9,81 m/s <sup>2</sup>
Straße	14,7 m/s <sup>2</sup> ; Amplitude von $\pm 0,05$ mm bei 2 .. 100 Hz
Zug	
See	1 .. 50 Hz bei 2,5 .. 0,075 mm
Luft	3 .. 500 Hz; 3 .. 0,025 mm

Tabelle 9: Umweltbelastungen durch mechanischen Schock [105]

Kategorie	Beschreibung
Landtransport	58,9 m/s <sup>2</sup> Spitze ; 5 .. 40 mm/s Schockbreite Wagenkopplungsvorgänge: 196 m/s <sup>2</sup> Geschwindigkeitsänderung: 5,4 m/s
Straße Zug	
See	Schock beim Landen / Abheben: bis 36,3 m/s <sup>2</sup>
Luft	

Diese typischen Applikationsbelastungen dienen als Referenz, um aus den standardisierten Prüfungen über geeignete Modelle auf die Applikationsebene rechnen zu können.

#### 4.5 Zuverlässigkeitsprüfverfahren

Zuverlässigkeitsprüfungen werden eingesetzt, um die Prüflinge beschleunigt zu altern. Dabei werden Prüflinge bei Ausfällen oder veränderten Qualitätsmerkmalen auf ihre Fehlermechanismen untersucht. Dafür müssen zunächst die Umwelteinflüsse bestimmt werden, die Fehler hervorrufen und zu einer Alterung führen.

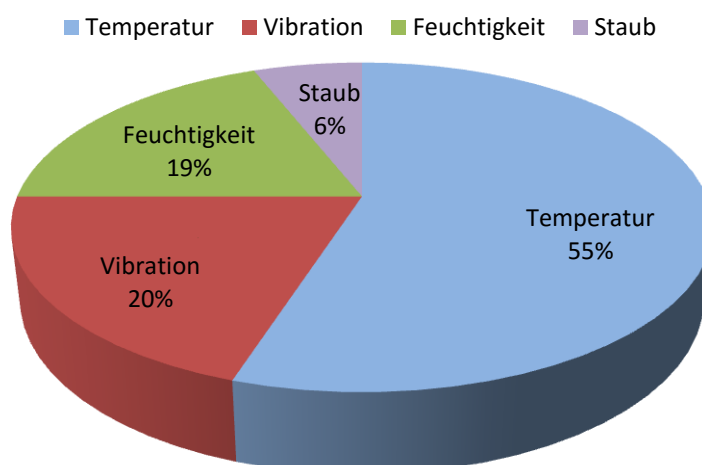


Abbildung 28: Generelle Ausfallursachen von Elektronik [106]

Abbildung 28 zeigt die Hauptausfallursachen und die wichtigsten Stressfaktoren. Den größten Einfluss hat mit 55 % die Temperatur, wobei hier Temperaturänderungen, -gradienten und absolute Temperaturen beinhaltet sind.

Entscheidend ist nicht nur die Zuordnung von Strukturelementen und Fehlermechanismen, sondern auch das Wissen, von welchen Umweltparametern diese Fehlermechanismen abhängig sind. Diese Einflussparameter müssen bestimmt werden, damit die dominanten Fehlermechanismen über die Zuverlässigkeitsprüfungen gezielt hervorgerufen werden können. Die folgende Tabelle zeigt eine solche Zuordnung für IC-Bauelemente nach [106].

Tabelle 10: Abhängigkeit der Fehlermechanismen von Umwelteinflüssen [106]

Komponente	Fehlermechanismus	Dominante Temperaturabhängigkeit	Weitere Abhängigkeiten
Draht	Ermüdung durch Biegung	$\Delta T$	
Drahtbond	Scher-Ermüdung	$\Delta T$	
Drahtbond	Kirkendall-Poren	$T$	
Chip	Bruch	$\Delta T$	$\sigma_m$
Chip	Elektrische Überlastung	$T$	$U, I$
Chip-Kleber	Ermüdung	$\Delta T$	
Moldmasse	Zersetzung	$T$	$RH$
Moldmasse	Rissbildung	$\Delta T$	$\sigma_m$
Gehäuse	Spannungsrissskorrosion	$\Delta T$	$RH$
Chip-Metallisierung	Korrosion	$\Delta T$	$RH$
Chip-Metallisierung	Elektromigration	$\Delta T$	$J, \nabla j$
Chip-Metallisierung	Hügelbildung	$T$	
Chip-Metallisierung	Migration der Metallisierung	$T$	
Chip-Metallisierung	Kontakt-Spiking	$T$	
Chip-Metallisierung	Dehnungskavitation	$T^{-1}$	$\varepsilon_m$



---

Gateoxid	Langsames Trapping	$T$	
Gateoxid	Elektrostatische Entladung	$T$	$U$
Gateoxid	TDDB	$T$	$U, (E)$
Bauelement	Ionische Verunreinigung	$T^{-1}$	$RH$
Bauelement	Forward Second Breakdown	$T$	
Bauelement	Reverse Second Breakdown	$T^{-1}$	
Bauelement	Ausbr. Oberflächenladung	$T$	
Grenzfläche Si/Oxid	Heiße Elektronen	$T^{-1}$	$U, E$

---

$U$	elektrische Spannung	$\sigma_m$	mechanische Spannung
$E$	elektrische Feldstärke	$\epsilon_m$	mechanische Dehnung
$I$	elektrischer Strom	$RH$	relative Feuchtigkeit
$\nabla j$	Gradient der Stromdichte		

Nahezu alle physikalischen Vorgänge sind temperaturabhängig, womit die Temperatur bei nahezu allen MEMS zu Performanceveränderungen führt [103]. Zudem ist die absolute Temperatur die treibende Kraft des Ausgasens (siehe Kapitel 4.3.3) und beeinflusst maßgeblich die Performancedegradation. Temperaturwechsel führen, wie auch in Kapitel 4.3.4 gezeigt, zu mechanischen Belastungen und damit zu Fehlern des Packages.

Ein möglicher Einfluss durch direkte Sonneneinstrahlung wurde durch einen Versuch in [25] untersucht. Abbildung 29 zeigt, dass unter intensiver Sonneneinstrahlung ein Memory-Effekt entsteht, der über die Zeit verschwindet. Bei 25  $\mu\text{m}$  und 17  $\mu\text{m}$  großen Bolometern mit amorphem Silizium konnte hierbei kein dauerhaft schädigender Einfluss gemessen werden.



Abbildung 29: Einpunkt-Kalibration bei solar-induziertem Memory-Effekt: (a) Sonnen-  
spur nach 2 min Einstrahlung; (b) Sonnenbild nach einer Einpunkt-Kalibrierung [25]

### Prüfstandards

Die Zuverlässigkeitsprüfungen müssen nach standardisierten Testverfahren durchgeführt werden, damit sie einheitlich, reproduzierbar und vergleichbar sind. Für Infrarotsensoren wurden in dieser Arbeit die Prüfnormen für Halbleiterhersteller der JEDEC Solid State Technology Association (kurz JEDEC) angewandt.

Betont wird in diesem Standard, dass die Prüfbedingungen an die Umgebungsbedingungen der Nutzerapplikation angepasst werden sollen. Weichen die Belastungen der Testbedingungen von denen im Anwendungsfall stark ab, werden ggf. zusätzliche Fehlermechanismen wirksam und die Lebensdauer wird zusätzlich verkleinert.

Tabelle 11: Abdeckung von Fehlermechanismen durch Standardprüfmethoden [104]

Fehlermechanismus	Aktivierungs- energie	Äquivalente Testzeit	Testdauer AEC Q100	Absiche- rung
Elektromigration	0,7 eV	537 h	1000 h	186 %
NBTI	0,1 eV	5343 h	1000 h	18,7 %
Hot Carrier	-0,2 eV	81795 h	1000 h	1,2 %
Trapped Ions	1,2 eV	211 h	1000 h	439 %

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Fehlermechanismen und damit Aktivierungsenergien in Tabelle 11 zeigt, dass starre Prüfungen nach Standardprüfmethoden, wie der AEC Q100 (eine fixe Zusammenstellung von Testverfahren), nicht optimal sind. Die individuell abgedeckten Testzeiten der Fehlermechanismen können entweder zu hoch oder zu niedrig sein. Die Applikationseignung kann so nicht sichergestellt werden und tatsächliche Abweichungen werden erst im Feld entdeckt. Eine bessere Herangehensweise, bei der die relevanten Fehlermechanismen untersucht werden, wird in dieser Arbeit gezeigt.

Im Folgenden werden die praktisch relevanten Umwelteinflüsse untersucht und die durchgeführten Testverfahren zur beschleunigten Alterung beschrieben.

#### Angewendete Stressfaktoren für Infrarotsensoren:

- a) Temperatur
- b) Thermische Zyklen
- c) Vibration
- d) Mechanischer Schock
- e) Elektrische Last
- f) Feuchtigkeit

##### **a) Temperatur**

Die Temperatur hat, wie zuvor beschrieben, einen großen Einfluss auf Alterungsverhalten und Sensorperformance. Die Prüfung erfolgt mit einer Temperaturlagerung, dem High Temperature Storage Life Test (HTSL) [107].

**b) Thermische Zyklen**

Belastungen durch thermische Zyklen (TC, temperature cycling) führen zu materialabhängigen mechanischen Spannungen. Beschrieben wird dieses Verhalten durch den materialabhängigen Temperatureausdehnungskoeffizienten (engl. coefficient of thermal expansion, kurz CTE). Besonders problematisch ist dies beim Package, da der CTE von Metall 6-mal größer als der von Silizium ist. Dabei kann es zu hohen Belastungen, Brüchen, Delamination oder bei stetigen aber geringen Belastungen zu Materialermüdungen kommen. Ermüdung durch thermische Wechselbelastungen ist der Hauptfehlermechanismus für das Versagen von Lötverbindungen [68].

Ermüdungsfehler durch thermische Wechsel summieren sich über die Zeit auf und führen zu einer Vergrößerung der Korngrenzen. Nach 25 % bis 50 % der Ermüdungslebenszeit formen sich Kavitäten an Korngrenzen, welche zu Mikrobrüchen führen. Diese wachsen zusammen, vergrößern sich und führen zu einer erhöhten Schadensakkumulation [7]. Je nach räumlicher Erscheinung und Geometrie des Objekts führt dies früher oder später zum Bruch. Ursache sind die thermischen Materialfehlanspassungen (CTE), deren Ausdehnungen schnell im Bereich plastischer Verformungen liegen [7].

Bei dem Prüfverfahren der thermischen Zyklen [108] wird das Testobjekt zwei Temperaturen wechselnd ausgesetzt und verweilt bei definierten Standzeiten bei diesen Temperaturen. Der Temperaturbereich muss an den Anwendungsfall angepasst sein, die Standzeit wird in [68] für Lötverbindungen mit 15 min empfohlen. Dies ist auch ein praktikabler Wert, da bei zu großen Standzeiten die Testzeit auch stark vergrößert wird und somit zusätzliche Kosten entstehen.

**c) Vibration**

Zyklische mechanische Belastungen können zu Adhäsion oder zum Bruch von Stütz/Hilfsstrukturen und bei langer Belastung zu Ermüdung führen. MEMS Strukturen scheinen im Vergleich zu konventionellen elektrischen Bauelementen sehr fragil zu sein, jedoch können sie großen Belastungen, wie Vibrationen oder Schock, widerstehen [109].

Vibration sind periodische Bewegungen um eine Gleichgewichtslage, die in den meisten Anwendungsbedingungen wie Automotiv, Aerospace oder Militär vorkommen. Durch die hohen vorherrschenden Frequenzen findet hierbei keine Spannungsrelaxation statt, zudem erhöht sich das Elastizitätsmodul bei hohen Frequenzen, was elastische Verformungen begünstigt. Gefährlich wird es hingegen bei einer Anregung um die Resonanzfrequenz, bei der es zu großen Kräften und Verformungen kommt [68]. Diese werden in Kapitel 5.5 für die Bolometer über Simulationen untersucht.

Die Schäden durch mechanische Wechselbelastungen wirken fundamental anders als die thermisch induzierten Fehler. Statt plastischen sind hier elastische Verformungen dominant. Die mechanischen Spannungen sind kleiner, wodurch Fehler über viele Zyklen, wie es für die klassische Mechanik typisch ist, entstehen.

Fehler entstehen durch die Konzentration von Spannungen an Fehlstellen und Defekten, bei denen es dadurch zu plastischen Verformungen bis hin zu Mikrobrüchen und -rissen kommen kann. Brüche entwickeln sich hierbei transgranular im Gegensatz zu intergranularen Ausbreitungen bei thermischen Belastungen. Unterschieden werden die Belastungen in hochzyklische Ermüdungen ( $10^5$  Zyklen) und in niederzyklische Ermüdungen, die eher auf plastischen Verformungen basieren. Laut [110] sind Ausfälle unabhängig zur Frequenz der zyklischen Belastung. Höhere Frequenzen bedeuten demnach mehr Zyklen und kürzere Zeiten bis zum Ausfall. Zudem gibt es keine Grenze der theoretischen Dauerfestigkeit.

Die Prüfung erfolgt mit dem Standard nach [111]. Die Proben werden dabei mit einer kontinuierlichen Sinusbewegung mit logarithmisch steigender Frequenz belastet. Die Belastung erfolgt bei dem höchsten Prüfniveau von 20 G Spitzenbeschleunigung und einem logarithmischen Frequenzverlauf von 20 Hz bis 2000 Hz. Ein Durchlauf dauert 4 Minuten, wobei die Frequenz einmal von unten nach oben und wieder zurück durchlaufen wird. Die gesamte Prüfung beinhaltet vier Durchläufe pro Orientierung (x, y, z).

**d) Mechanischer Schock**

Ein mechanischer Schock ist ein einzelner mechanischer Einschlag, der mechanische Energie durch das gesamte Bauteil überträgt. Übersteigen die applizierten Spannungen die maximale Bruchfestigkeit, können Adhäsionen, Chipbruch und Scherung von Bonddrähten die Folge sein.

Diese hohen Belastungen beschreiben eher Unfälle wie Stöße, z. B. beim Fallenlassen eines Gerätes oder beim Transport, und deren Überlebenswahrscheinlichkeit. Schockbelastungen liegen in einem Bereich von 500 bis 30.000 G mit einer Pulsdauer zwischen 0,1 bis 1 ms.

Mechanische Schockprüfungen erfolgen mit der Prüfnorm nach [112], bei der verschiedene Beschleunigungsspitzenwerte gewählt werden können. Im anschließenden Funktionstest dürfen weder das Package, die Bolometer oder der Chip zerstört werden.

**e) Elektrische Belastung**

Die elektrische Belastung durch elektrische Spannungen und Felder (siehe Kapitel 4.1 unter ASIC und Tabelle 10) resultieren aus dem Betrieb der Ausleseschaltung und der Bolometer. Die Prüfung erfolgt durch den High Temperature Operating Life Test (HTOL) [113]. Die Beschleunigung erfolgt dabei durch erhöhte Temperatur und über die Zeit, da die Sensoren im Dauerbetrieb laufen. Im Vergleich zum HTSL muss der Infrarotsensor beim HTOL zusätzlich applikationsnah elektrisch betrieben werden. Dies stellt für ein so komplexes System wie Infrarotsensoren eine fordernde Aufgabe dar. Der Sensor muss mit allen zum Betrieb nötigen Versorgungs- und Referenzspannungen sowie Takt- und Steuersignalen versorgt werden. Da ein Sensor somit viele Signalleitungen braucht und in einem HTOL-Test eine hohe Anzahl an Prüflingen gleichzeitig belastet werden, ist ein komplexer speziell designter Prüfaufbau mit einem hohen Anspruch an das Leiterplattenlayout, Verdrahtung und Signalauswertung nötig.

**f) Feuchtigkeit**

Feuchtigkeit ist ein klassisches Problem bei hydrophilen Plastikpackages. Auf Grund der hohen Prozesstemperaturen von bis zu 260 °C kommt es zu einer raschen Verdampfung und damit Expansion des Wassers, wodurch Schäden verursacht werden können [114] (auch Popcorn-Effekt genannt). Des Weiteren kondensiert Wasser in Spalten und Poren, wodurch sich die Eigenspannungen der Materialien erhöhen. Bei zu einander sehr nahen Oberflächen, wirken zusätzlich zu Van-der-Waals-Kräften noch stärkere Kapillarkräfte. Dies ist ein Grund warum Inertialsensoren ein hermetisches Packages benötigen, da deren Eigenschaften durch Kapillarkräfte negativ beeinflusst werden [115].

Da das Package von Infrarotsensoren hermetisch ist, kann die Feuchtigkeit nur Fehlermechanismen auf der Außenseite des Packages erzeugen. Der Einfluss wird damit als gering abgeschätzt.

Die Feuchtigkeitsprüfung [116] (AC, Autoclave) erfolgt mit einer Dampfdruckprüfung mit kondensierender, hoch feuchter Atmosphäre (100% RH), bei hoher Temperatur (121 °C) und Dampfdruck (205 kPa).

**Weitere nicht angewandte Prüfungen:**Radioaktive Strahlung

Der Einfluss von radioaktiver Strahlung auf MEMS, ist ein kaum erforschter Bereich. Forschungen in [117] zeigen strahlungsbasierte Schäden an mechanischen Strukturen, wobei mechanisch bewegliche und durch elektrische Felder gesteuerte Strukturen (elektrostatische Antriebe) besonders gefährdet sind. Zudem kommt es zu Schäden in Gitterstrukturen, womit die Anfälligkeit für Brüche steigt. Kritisch sind weitere Untersuchungen nur für Anwendung mit hoher Strahlungsbelastung (Aerospace).

### Thermischer Schock

Thermische Schocks sind extrem hohe und schnelle Temperaturwechsel (z. B. ein Wechsel von -40 °C zu +85 °C unter 20 s) und weisen andere Fehlermechanismen auf als thermische Zyklen. Durch die hohen Materialbelastungen und Temperaturgradienten kommt es schnell zum Bruch von Strukturelementen [68]. Diese in flüssigen Medien durchgeführte Prüfung sollte nur erfolgen und ist auch nur dann relevant, wenn extreme Temperaturwechsel in Einsatzbedingungen möglich sind.

### Fazit:

Es müssen zum einen die in der Applikation wirkenden Umwelteinflüsse bestimmt werden, um deren Einfluss auf die Zuverlässigkeit bestimmen zu können. Diese werden dann in den Prüfungen, dem Infrarotsensor mit erhöhter Intensität zu geführt, um diesen in kürzester Zeit beschleunigt altern zu lassen.

Auf der anderen Seite muss aber auch analysiert werden, von welchen Einflussgrößen die potentiell relevanten Fehlermechanismen abhängig sind. Damit können die Fehlermechanismen durch diese Einflussfaktoren beschleunigt gealtert werden. So ist die Alterung der Sensorperformance beispielsweise abhängig von der Temperatur. Folglich wird eine standardisierte Prüfung, wie in in diesem Beispiel eine Temperaturlagerung (HTSL) zur beschleunigten Alterung eingesetzt.

Hierbei werden standardisierte Zuverlässigkeitsprüfungen wie z. B. der HTSL nach JEDEC-Standard genutzt, um einheitliche und vergleichbare Prüfungen zu realisieren. Gewisse Testparameter wie die Prüflintensität und die Prüfzeit werden aber verändert, um individuellen Applikationsprofilen zu entsprechen und deren Zuverlässigkeitsanforderungen abzudecken.

Die Ergebnisse dieser Zuverlässigkeitsprüfungen werden im folgenden Kapitel vorgestellt.



# 5 Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Zuverlässigkeitsprüfungen auf Grundlage der Voruntersuchung in Kapitel 4 beschrieben. Zuerst werden die Versuche zur thermischen Alterung und die dabei auftretende Degradation der Sensorperformance vorgestellt. Dabei werden die in Kapitel 4 vorgestellten möglichen Fehlermechanismen auf ihren Beitrag zur Degradation untersucht. Daraufhin folgen Versuche zur Bewertung von Elektromigrationschäden und des Einflusses von mechanischen und thermo-mechanischen Wechselbelastungen auf Bolometer und Package.

## 5.1 Degradation der Sensorperformance

Die Infrarotsensoren wurden in den Zuverlässigkeitsprüfungen mit den HTOL- und HTSL-Prüfungen thermisch beschleunigt gealtert. Dabei wird die Responsivität am Bauelementemessplatz gemessen. Entscheidend ist dabei weniger der Absolutwert der Responsivität, als dessen Änderung über die Zeit. Die Degradation ist ein kritischer Fehlermechanismus, da es bei einer Lagerung unter konstant 20 °C über ein Jahr, bereits zu Verringerung der Responsivität von 9,8 % (gemittelt über 4 Sensoren) kommt.

Getestet wurden hierbei Bauelemente, das heißt Infrarotsensoren, die auf Platinen aufgebaut sind und einzelne Chip-Scale-Packages. Die CSPs können an einem speziellen Messplatz über Kontaktnadeln charakterisiert werden [2]. Dieser Test weist zwar größere Ungenauigkeiten als der von Bauelementen auf, ermöglicht aber das Testen der reinen CSPs ohne Platine. Damit wird es möglich diese isoliert zu untersuchen und unter höheren Temperaturen zu belasten, da die Platine hierbei deutlich geringe Grenzwerte zulässt.

Die Verringerung der Responsivitäten ist bei den HTOL- und HTSL-Prüfungen, wie man an den über jeweils drei Sensoren gemittelten Messpunkten in Abbildung 30 sieht, gleich. Es ergeben sich lediglich Abweichungen im Rahmen der möglichen Messgenauigkeit und Bauteiltoleranzen. Die elektrische Belastung des HTOL zeigt somit keine zusätzliche Degradation an. Bei den Prüfungen kam es auch nach über 3000 h Betriebszeit zu keinen Ausfällen, wodurch ein systematisches Ende der Lebensdauer nicht bestimmt werden konnte. Jedoch kommt es zu einer Reduzierung der Sensorperformance von ca. 20 % nach 3000 h.

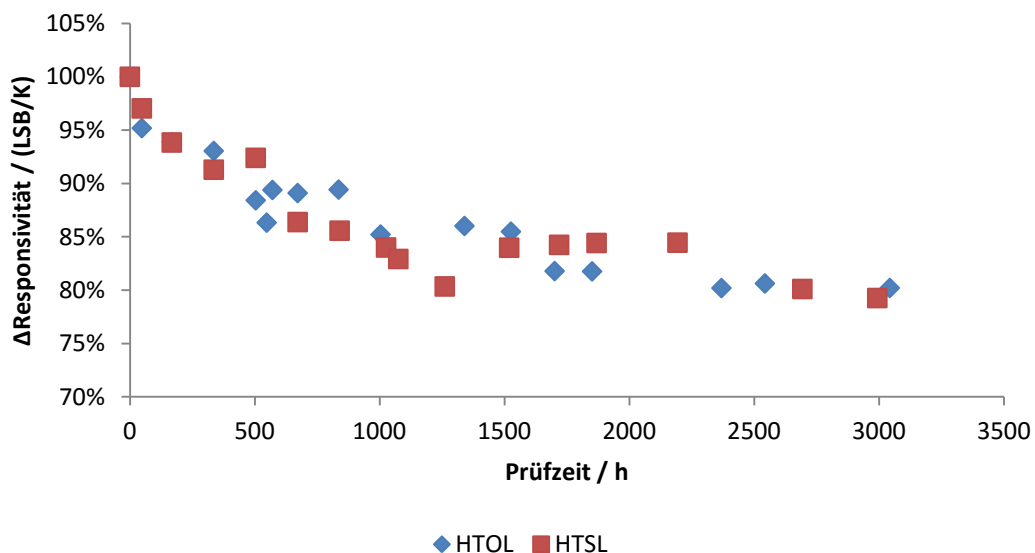


Abbildung 30: Vergleich der relativen Responsivitäten bei HTOL- und HTSL-Prüfungen und jeweils 115 °C als Mittelwert über 3 Bauelemente

Ebenfalls kommt es durch die Temperaturlagerung zu einer temperaturabhängigen Erhöhung des elektrischen Widerstandes der Bolometer (Abbildung 31). Diese führt aber nicht direkt zu einer Veränderung der Responsivität (siehe Gleichung (4.2)) oder des NETD-Wertes (4.1), falls das Rauschen sich nicht erhöht. Eine hieraus resultierende Verringerung des elektrischen Stromes wird durch die Ausleselektronik mit ihrer Offsetkorrektur ausgeglichen. Entspre-

chend kann aus dieser Offsetspannung die Widerstandsänderung abgeleitet werden.

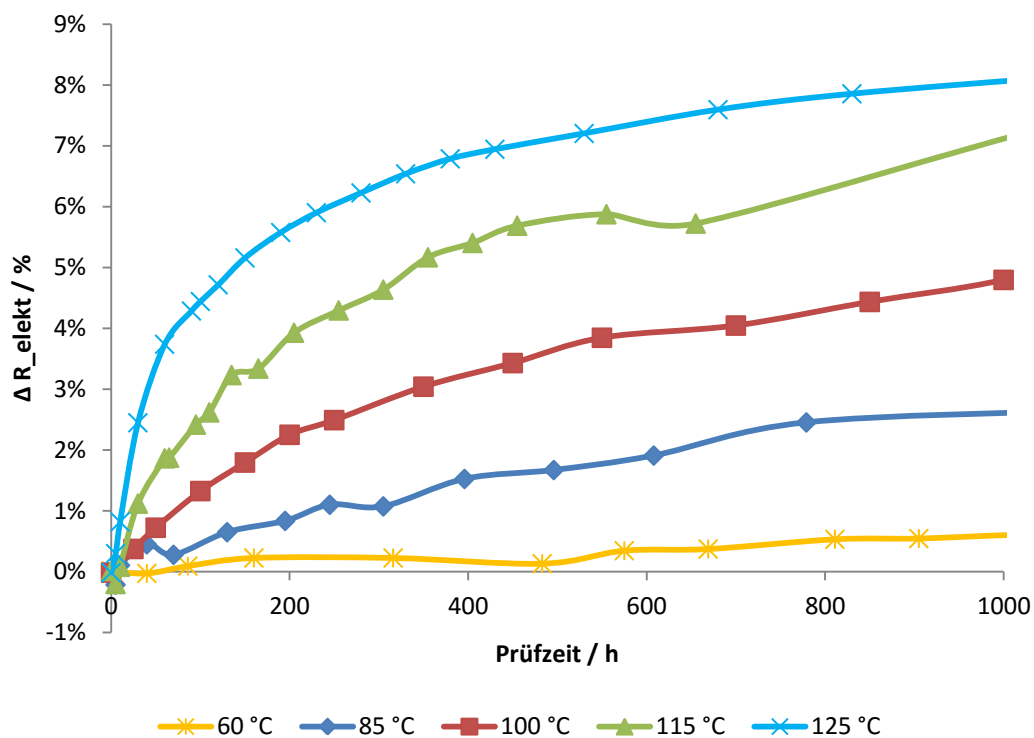


Abbildung 31: relative exponentielle Vergrößerung des elektrischen Widerstandes bei verschiedenen Auslagerungstemperaturen

Im Weiteren werden die in Kapitel 4 beschriebenen potentiellen Fehlermechanismen, die zur Performancedegradation führen können, wie das Rauschen, der TCR, die Transmission und die thermische Isolation einzeln untersucht.

### 5.1.1 Rauschen

Das Rauschen wird zum einen anhand von Testfeldern des Sensormaterials untersucht, an denen Messungen direkt durchgeführt werden können und zum

anderen am Bauelement gemessen, indem das Rauschen aus 50 Digitalbildern berechnet wird.

### a) Messungen an Teststrukturen

Die Teststrukturen des Sensormaterials wurden bei 100 °C, 150 °C und 200 °C für 1000 h ausgelagert und jeweils vorher und nachher vermessen.

Die Messungen wurden an einem Rauschmessplatz durchgeführt, der aus einem rauscharmen Stromverstärker und einer stabilen rauscharmen Offset-Spannungsquelle besteht. Der gesamte Aufbau wird durch ein  $\mu$ -Metallgehäuse und eine Aluminiumbox gegen elektromagnetische Strahlen abgeschirmt. Über einen Spektrumanalysator wird per Fast-Fourier-Transformation das Leistungsdichtespektrum des Rauschstroms bestimmt.

Im Folgenden werden die aufgenommenen Rauschspektren vor und nach der Alterung verglichen. Es lässt sich bei keinem Prüfling eine signifikante Änderungen im Rauschverhalten erkennen. Das Rauschen hat, wie in Kapitel 4 vermutet, ein deutliches  $f^{-1}$  Verhalten.

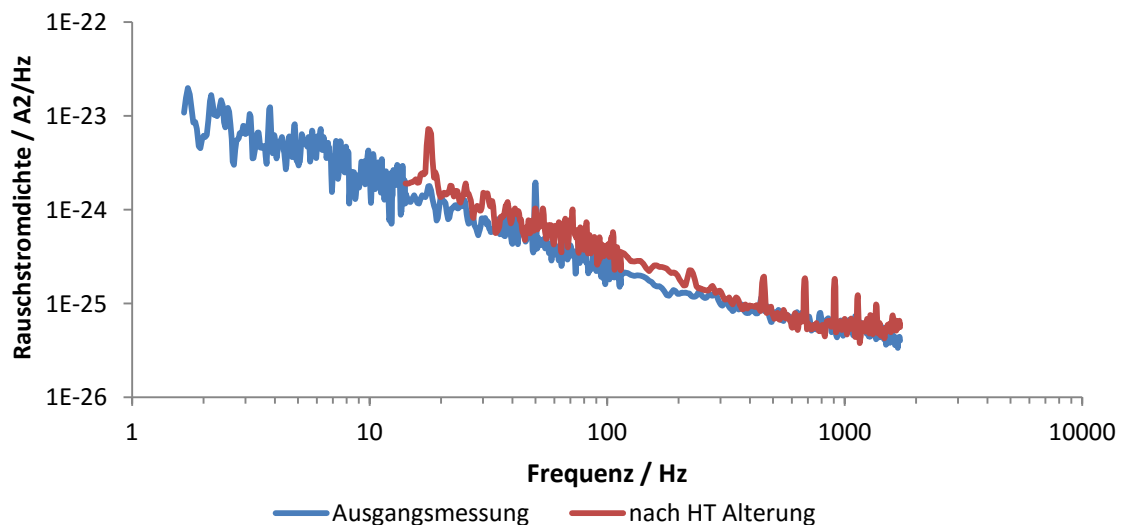


Abbildung 32: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 100 °C

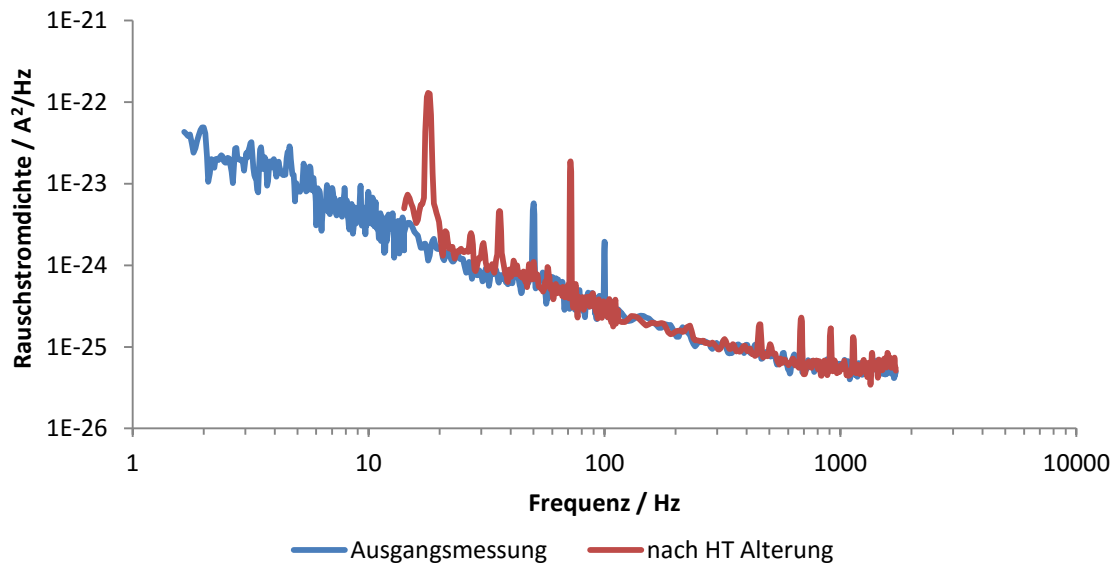


Abbildung 33: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 150 °C

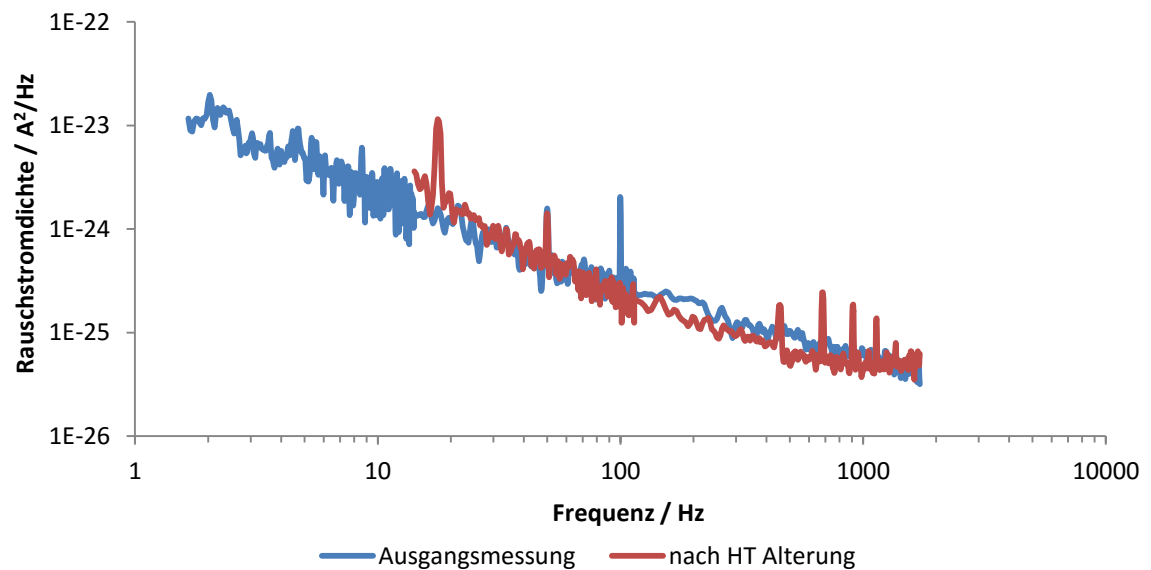


Abbildung 34: Vergleich des Rauschens des Sensormaterials vor und nach HTSL Alterung bei 200 °C

## b) Messungen am Bauelement

Das Rauschen wurde an 30 Bauelementen untersucht, die mit einem HTOL Test über 1000 h und 115 °C belastet wurden. Die Rauschwerte berechnen sich aus dem Mittelwert über die Standardabweichung aller Pixel und über 50 Frames.

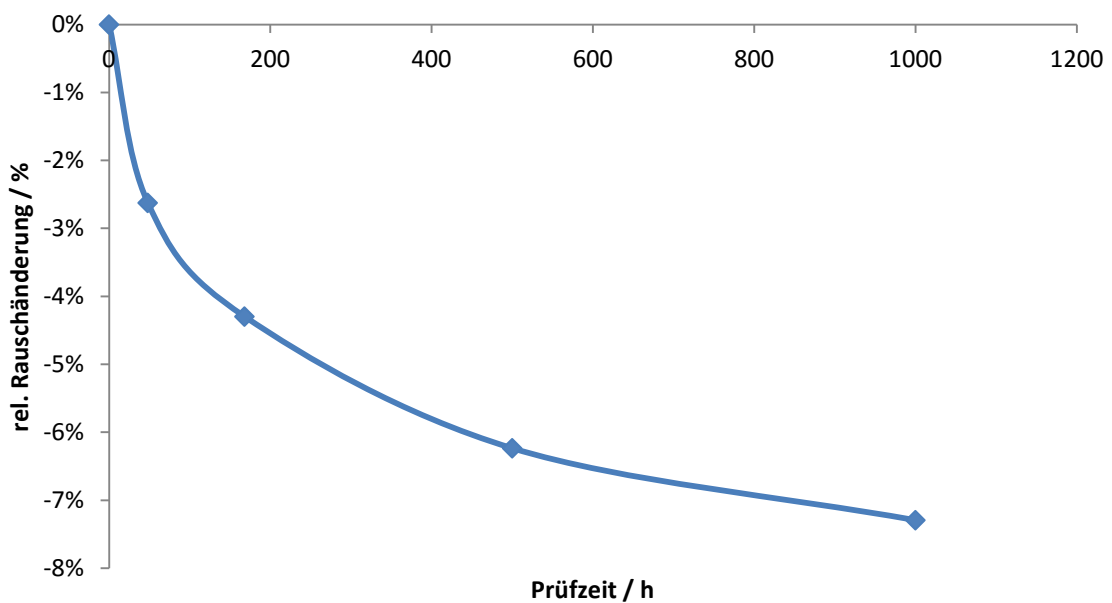


Abbildung 35: relative Rauschänderung gemittelt über 30 Sensoren bei 115 °C HTOL

Wie in Abbildung 35 dargestellt, verringert sich das Rauschen über die thermische Alterung über 1000 h bei 115 °C im Mittel um 7,3 %.

Dies hat einen positiven Einfluss auf den NETD Wert, der jedoch von der sinkenden Responsivität überstimmt wird. Bei den hier durchgeführten Messungen an 30 Sensoren reduziert sich die Responsivität im Mittel um 10,5 %. Der NETD Wert verschlechtert sich im Mittel aber nur um 3,4 %, da das Rauschen sich um 7,3 % verringert. Somit mindert das sinkende Rauschen die Auswir-

kung der sinkenden Empfindlichkeit (Responsivität) auf die thermische Auflösung (NETD) der Infrarotsensoren.

### 5.1.2 Deckeltransmission

Um eine mögliche Degradation der Sensorperformance durch eine verringerte Deckeltransmission zu untersuchen, wurden einzelne Deckelchips mit den Prüfungen nach Tabelle 12 beschleunigt gealtert. Die Prüfungen waren darauf ausgerichtet, eine möglichst hohe Beschleunigung und damit intensive Alterung zu erzeugen, um eine potentielle Degradation eindeutig zu erkennen.

Tabelle 12: Zuverlässigkeitsprüfungen zur Degradation der Deckeltransmission

Prüfung	Prüfdauer	Prüfbedingung
Temperaturlagerung	1000 h	150 °C
Temperaturlagerung	500 h	200 °C
Dampfdruckprüfung	350 h	121 °C / 100 % RH
Temperaturwechsel	750 x	-40 °C / +85 °C
Temperaturwechsel	300 x	-50 °C / +135 °C
Temperaturwechsel	1000 x	-50 °C / +150 °C

Die Messung der Transmission erfolgt mit einem FTIR-Spektrometer (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer). Die gemessenen Spektren vor und nach den Alterungsprüfungen werden in dem relevanten Wellenlängenbereich von 8 bis 14  $\mu\text{m}$  verglichen. Das FTIR ist nicht kalibriert, musste vor den Messungen neu eingestellt werden und die Messungen liegen zeitlich um einige Monate auseinander. Die Messwerte über 100 % sind physikalisch nicht plausibel und auf einen Fehler in der Messung oder Kalibrierung zurück zu führen. Um trotzdem vergleichbare Ergebnisse zu erreichen, wurde ein Deckelchip nicht gealtert und als Referenz eingesetzt.

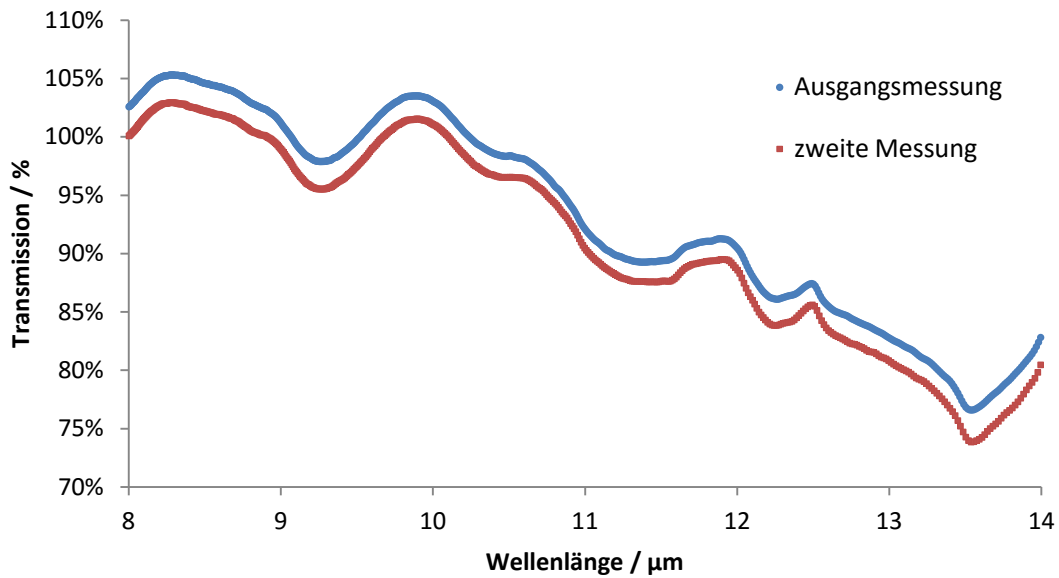


Abbildung 36: Vergleich der Transmissionsspektren des Referenzchips, bei der Ausgangsmessung (blau) und der zweiten Messung als Referenz (rot)

Ein Vergleich der Spektren in Abbildung 36 zeigt einen deutlichen Offsetfehler der Messeinrichtung um ca. 2,3 % im Mittel, der bei den Vergleichsmessungen berücksichtigt werden muss.

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen in Tabelle 13 zeigen eine verringerte relative Transmission um 2 bis 6 %. Die Transmissionswerte sind die Mittelwerte über den Wellenlängenbereich von 8 bis 14 μm. Alle Messungen fallen nach der Alterung im Mittel um 3,55 % geringer aus. Dies entspricht jedoch auch näherungsweise dem Offsetfehler zwischen den Messungen. Weiterhin zeigen sich Schwankungen innerhalb der Prüfungen von z. B. 1,25 % innerhalb des HTSL und 2,23 % beim AC Test. Folglich sind die Ungenauigkeiten der Messung größer als eine stattfindende Degradation und eine systematische Verringerung der Transmission kann nicht bestimmt werden.



Tabelle 13: Prüfergebnisse der beschleunigten Alterung an Deckelchips

Prüfung	$\phi$ Ausgangsmessung	$\phi$ nach Stress	$\Delta\phi$	$\Delta\phi$ mit Korrektur
Referenz	95.76%	93.62%	-2,14%	0.16%
TC	97.49%	94.64%	-2,85%	-0.55%
TC	96.06%	94.06%	-2.00%	0.30%
HT	97.24%	93.21%	-4.03%	-1.73%
HT	98.35%	93.07%	-5.28%	-2,98%
AC	96.36%	93.18%	-3.18%	-0,88%
AC	96.85%	91.44%	-5.41%	-3.11%
MITTEL	96.87%	93.32%	-3.55%	-1.25%

Ein Vergleich der Spektren, wie sie beispielhaft in Abbildung 37 dargestellt sind, zeigen, dass die Spektren parallel verschoben sind und es keine signifikanten Einbrüche im Wellenlängenspektrum gibt. Dies deutet wiederum auf eine Messabweichung hin.

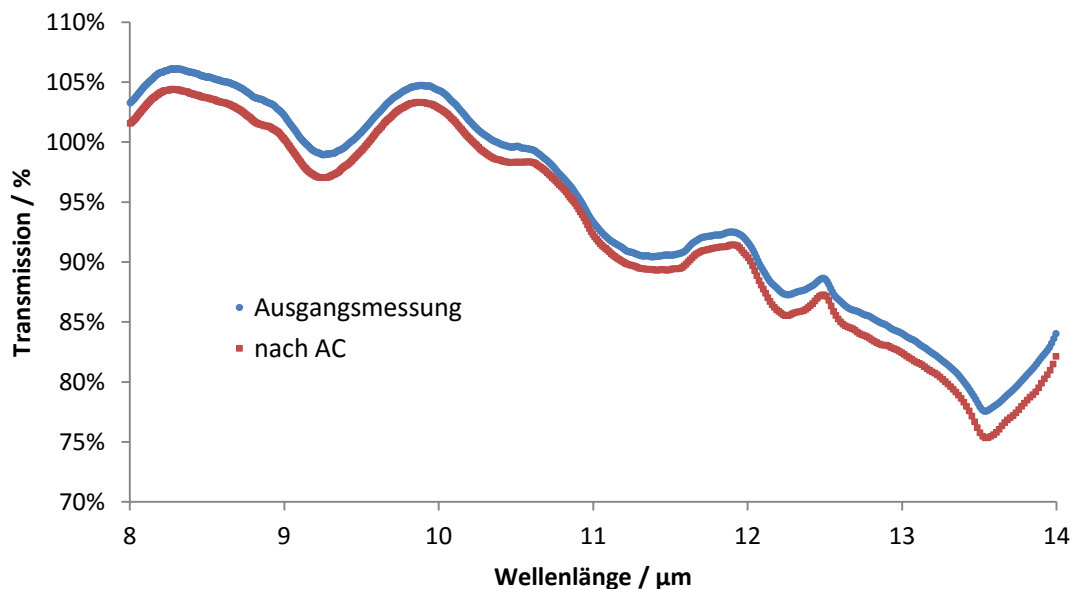


Abbildung 37: Vergleich der Transmissionsspektren eines Deckelchips vor (blau) und nach Alterung (rot) durch die Dampfdruckprüfung

Obwohl die eingesetzten Prüfungen eine intensive Alterung der Deckelchips forcierten, konnte keine eindeutige Degradation der Transmission bestimmt werden. Zudem sind auch theoretisch keine physikalischen Fehlermechanismen bekannt. Die Deckel-Transmission hat folglich keinen Anteil an dem Performanceverlust des Infrarotsensors.

### **5.1.3 TCR**

Der TCR (Temperaturkoeffizient) beschreibt die Empfindlichkeit der Bolometer auf die Eingangsgröße der Temperatur. Eine Verringerung des TCR führt damit direkt zu einer Performanceverschlechterung des Infrarotsensors.

#### **a) Versuche an Teststrukturen**

Um die Degradation des TCR zu untersuchen, wurden Teststrukturen mit dem Sensormaterial bei Hochtemperatur gelagert und der TCR direkt und analog gemessen. Hierfür wurde der elektrische Widerstand der Sensorschicht bei 25 und 40 °C gemessen und der TCR berechnet. Grundlage dieses Versuches sind sieben Proben bei jeweils drei verschiedenen Temperaturen. Der Verlauf der gemessenen TCR-Werte als Mittelwerte über die verschiedenen Proben ist normiert in Abbildung 38 dargestellt.

Nach einer anfänglichen sprunghaften Vergrößerung des TCR bleibt dieser innerhalb seiner Messgenauigkeit von ca. 3 % gleich und verändert sich nicht erkennbar. Eine Degradation des TCR müsste somit kleiner als die Messgenauigkeit dieses Verfahrens sein. Die Bauelemente weisen dieses Sprungverhalten nicht auf.

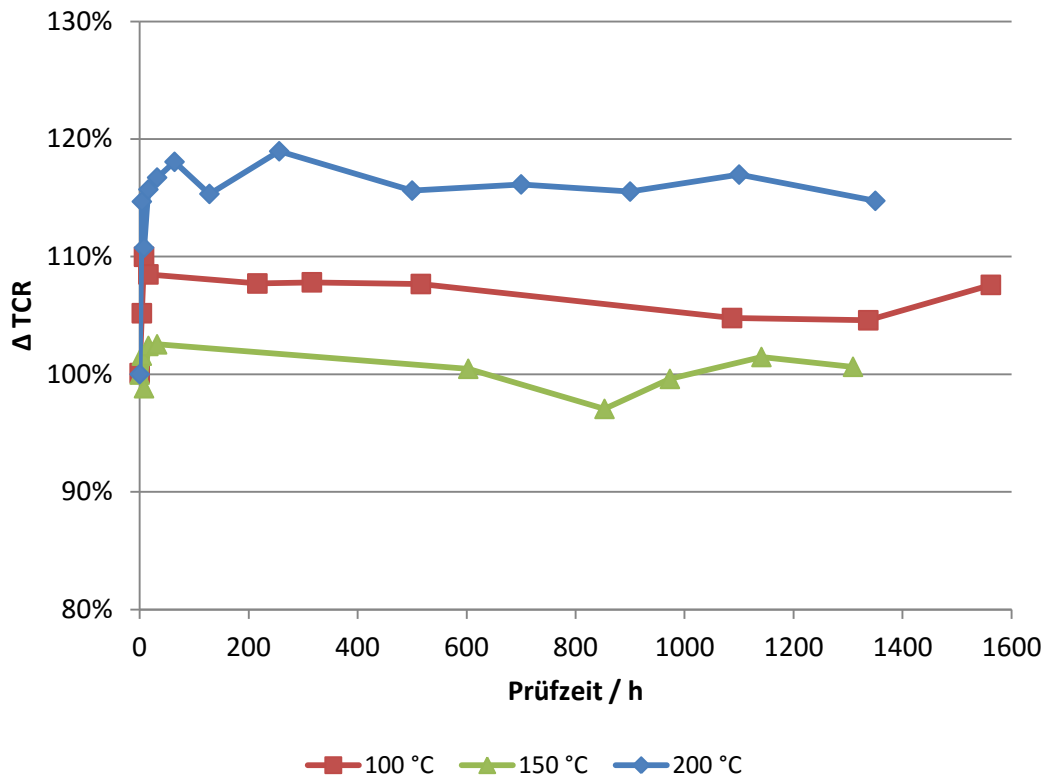


Abbildung 38: relative Änderung des TCR von Teststrukturen bei verschiedenen Auslagerungstemperaturen

### b) Versuche am Bauelement

Der TCR wird auch auf Bauelementebene gemessen, indem die Änderung des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur gemessen wird. Hierfür wurde ein Temperaturcontroller eingesetzt, um den Infrarotsensor auf unterschiedliche Temperaturen einzuregulieren. Die so berechneten TCR-Werte sind in Abbildung 39 über die Prüfzeit und für verschiedene Auslagerungstemperaturen dargestellt.

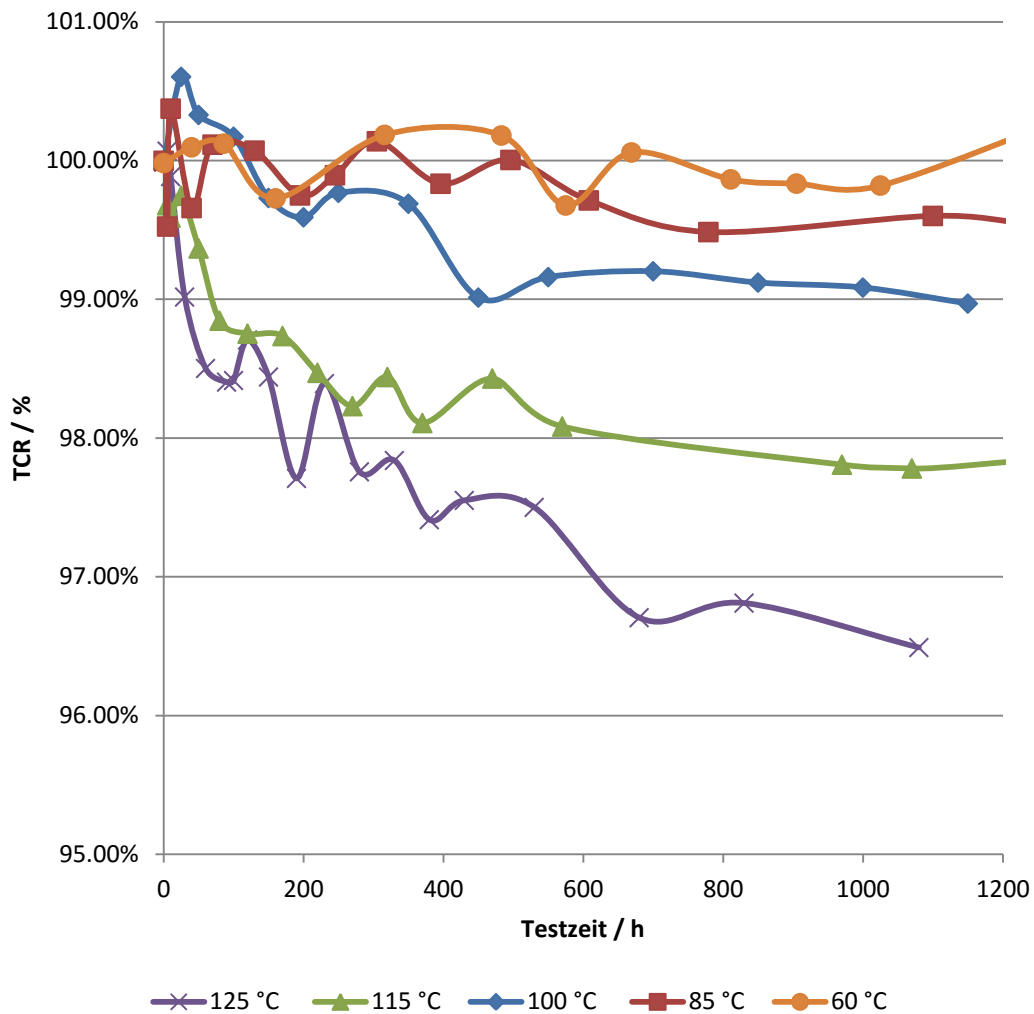


Abbildung 39: gemessener relativer TCR an aufgebauten Infrarotsensoren

Zu beachten ist, dass die über den Temperaturregler eingestellte Temperatur über einen Temperatursensor geregelt wird, der am Temperaturregler sitzt. Damit kann es, bedingt durch den thermischen Widerstand, vom Temperaturregler bis zum Substrat zu einer abweichenden Substrat- und damit Bolometertemperatur kommen. Um dieses Verhalten auszugleichen, werden die gemessenen TCR-Werte ( $TCR(x)$ ) mit einer Temperaturkompensation (5.1) ergänzt. Hierbei wird der Messwert des digitalen Temperatursensors zu einem Messzeitpunkt  $T_{Dig}(x)$  im Verhältnis zu einem Referenzwert  $T_{Dig}(x_0)$  auf dem IRFPA Substrat genutzt, um die Temperaturdifferenz der Bolometer genauer zu

bestimmen. Die somit erreichbare Wiederholgenauigkeit dieser Messung kann damit deutlich verbessert werden und erreicht Werte von ca. 0,5 %, wie man in Abbildung 39 an dem TCR-Werten bei 60 °C sehen kann.

$$TCR(x) * \frac{T_{Dig}(x_0)}{T_{Dig}(x)} \quad (5.1)$$

Im Gegenteil zu den Messungen an Teststrukturen zeigt sich bei der Messung des TCR an Bauelementen, aufgrund der höheren Messgenauigkeit, eine Degradation über Zeit und Temperatur. Diese ist jedoch im Verhältnis zur gesamten Degradation gering (siehe Abbildung 40) und hat einen Anteil von ca. 10 %. So ist die Responsivität nach 1000 h bei 125 °C um 22,5 % und der TCR um 2,8 % gesunken. Die vollständige Performancedegradation kann somit nicht erklärt werden und muss somit hauptsächlich durch die thermische Isolation und geringfügig durch den TCR verursacht werden.

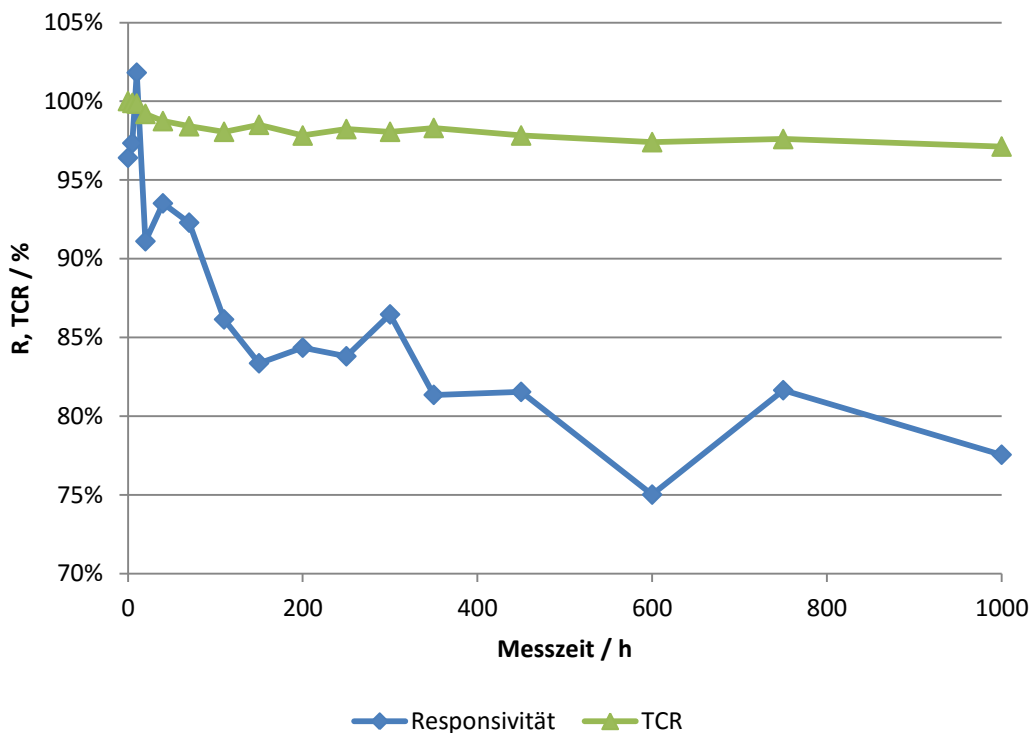


Abbildung 40: relative Messwerte des TCR und der Responsivität über eine Temperaturlagerung bei 125 °C

In Abbildung 41 wurde das Verhältnis der Responsivitätsänderung ( $\Delta R$ ) und der Änderung des TCR ( $\Delta TCR$ ) zur Änderung des elektrischen Widerstandes ( $\Delta R_{\text{elekt}}$ ) gebildet und über einer Auslagerung bei 115 °C für einen Infrarotsensor dargestellt. Bei beiden lässt sich ein lineares Verhältnis erkennen, womit die Größen physikalisch zusammenhängen und voraussichtlich die gleiche Ursache haben. Folglich wären die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Ausgasprozesse und die daraus resultierende Verringerung an Wasserstoff eine möglich Erklärung für dieses Verhalten. Dies wird durch weitere Messungen unterstützt, da in Kapitel 5.1.4 das Ausgasen größerer Mengen Wasserstoff ermittelt wurde.

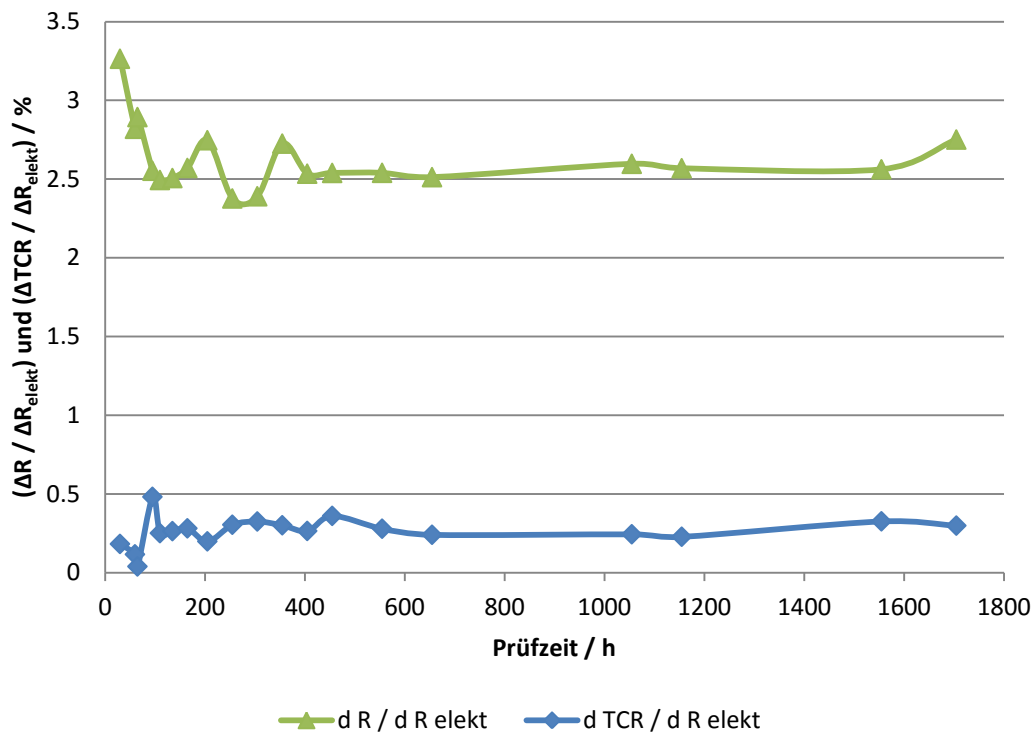


Abbildung 41: Verhältnis der Änderung der Responsivität zum elektrischen Widerstand (grün); und der Änderung des TCRs (blau) zum elektrischen Widerstand bei einer Temperaturlagerung von 115 °C

### 5.1.4 Thermische Isolation

Ein Verlust der thermischen Isolation der Bolometer hängt wie Kapitel 4.2 gezeigt direkt von einem Anstieg des Package-Innendrucks ab. Den Innendruck direkt zu messen ist, wie in Kapitel 7 gezeigt, nur mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Vakuumsensors möglich. Die Gase, die in dem Package ausgasen, werden mit einer zerstörenden Restgasanalyse bestimmt.

#### a) Restgasanalysen

Restgasanalysen werden durchgeführt, indem das Package in einer Vakuumkammer punktiert und damit zerstört wird. Die Gase des Packages werden abgesaugt und mit einem Time-of-Flight-Massenspektrometer auf seine Bestandteile analysiert. Die Restgasanalyse wurde nach einem Vorheizprozess bei 100 °C für 24 h durchgeführt.

Tabelle 14: Restgasanalysen von CSPs vor und nach thermischer Alterung bei 150 °C und 2000 h

	Einheit	Start #1	Start #2	HTSL 150°C #1	HTSL 150°C #2
Gesamtdruck	Torr	5,4 E-8	5,6E-8	6,1E-8	7,1E-8
Stickstoff	%	6,59	6,51	36,8	25,8
Sauerstoff	ppm	-	-	-	-
Argon	%	60,8	53,2	14,6	18,1
Kohlendioxid	%	1,03	1,24	2,31	4,11
Wasserdampf	ppm	-	-	-	-
Wasserstoff	%	14,9	21,5	30,9	35,9
Helium	ppm	-	-	-	-
Fluorcarbon	ppm	-	-	-	-
Methan	%	15,1	16,1	15,4	16,1
Kohlenwasserstoff	%	1,58	1,53	-	-

Es wurden jeweils zwei Proben vor und nach einer thermischen Alterung in Tabelle 14 verglichen. Die Alterung erfolgte dabei über 2000 h bei 150 °C. Der gemessene Gesamtdruck in Zeile 1 ist dabei nicht der Innendruck des Packages, dieser kann nicht direkt gemessen werden, sondern der Druck in der Messkammer. Da bei dem geringen Package-Volumen und sehr niedrigen Innendrücken die Anzahl an Gasmolekülen sehr gering ist, steigt der Kammerdruck kaum an und der Innendruck kann nicht mehr sinnvoll gemessen werden. Obwohl ein hochauflösendes Analysegerät (HR-IVA, „high resolution internal vapor analyzer“) eingesetzt wurde, kann der Innendruck von Infrarotsensoren so nicht bestimmt werden. Allerdings erkennt man einen Anstieg des Kammerdrucks nach der Alterung um ca. 10 bis 30 %. Dies würde mit einer potentiellen Performancereduktion, die sich in der gleichen Größenordnung befindet, korrelieren.

Ein grafischer Vergleich der Gaszusammensetzung erfolgt in Abbildung 42. Bei einem Vergleich muss beachtet werden, dass hierbei die relative Zusammensetzung der Gase angezeigt ist. Dies bedeutet zum Beispiel, dass sich der Argon-Anteil nach der Alterung nicht reduziert, sondern die anderen Anteile größer geworden sind. Bei den Gaszusammensetzungen ist der anfängliche Anteil von Argon mit ca. 60 % sehr hoch, er sinkt aber nach der Alterung um ca. 75 % (siehe Abbildung 42). Da Argon als Edelgas nicht durch Metalle diffundieren kann und auch nicht vom Getter aufgenommen wird, sollte die absolute Argon-Gasmenge ungefähr gleich bleiben. Demzufolge müssen die restlichen Gase aufgenommen haben. Am stärksten gasen hier Stickstoff und Wasserstoff aus, danach folgen Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid.



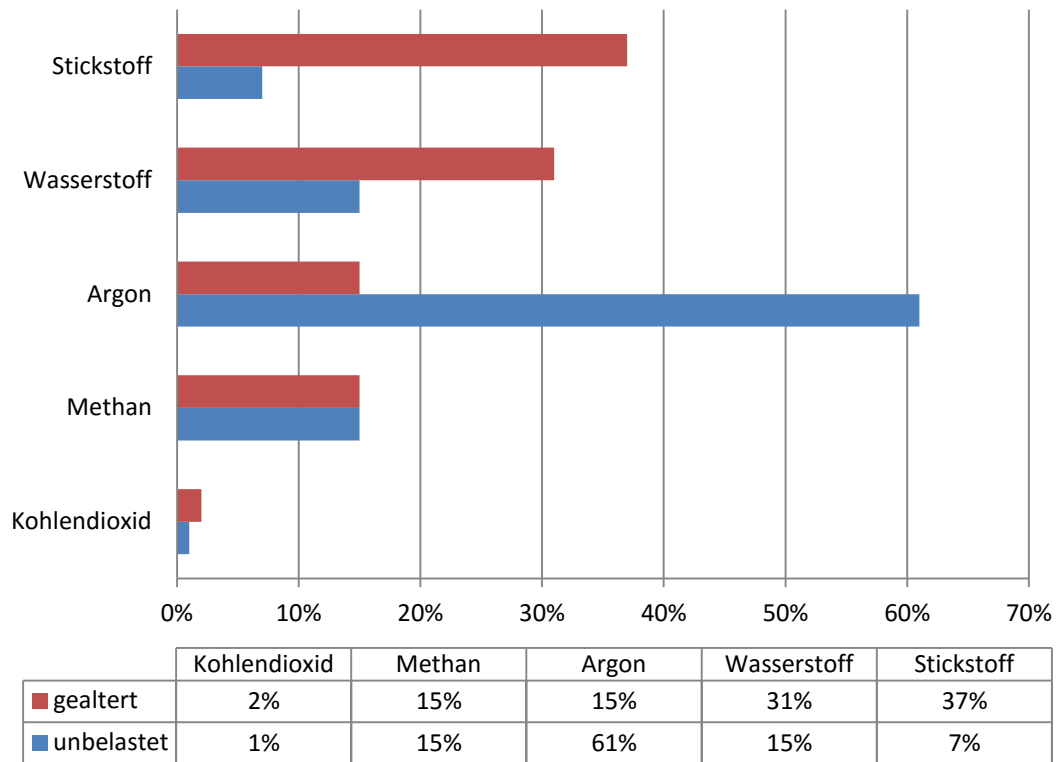


Abbildung 42: Vergleich der Gasspektren eines ungestressten und eines gealterten Packages

Diese Messungen bestätigen die Analyse vergleichbarer Packages in [87] und [93] nach denen der Innendruck hauptsächlich durch das Ausgasen von Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Kohlenwasserstoffen erhöht wird.

Die Anreicherung von Wasserstoff kommt nach Saito [118] hauptsächlich vom galvanisch abgeschiedenen Nickel des Packages. Während des Platingverfahrens entwickelt sich Wasserstoff auf der Elektrode durch Elektrolyse. Diese Oberfläche hat genügend Energie, um eine nennenswerte Menge an Wasserstoff in eine einatomige Form zu dissoziieren, die dann in das Nickel selbst diffundiert. Zudem muss die Temperatur des Vorheizprozesses über 350 °C betragen um Wasserstoff aus Eisenlegierungen zu entfernen, was aber bei eutektischen Lötverbindungen nicht möglich ist [118].

## b) Vakuumsensor

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vakuumsensor [119] ist in der Lage, die thermische Isolation und damit den Innendruck zu überwachen. Der im Kapitel 6 vorgestellte Vakuumsensor (als Realisierung des Zuverlässigkeitsprüfungssystems) wird an dieser Stelle schon einmal vorab eingeführt, um dessen Einsatz bei der Innendruckmessung zu zeigen. Die Messwerte des Vakuumsensors  $VS$  sind laut Formel (6.5) im Kapitel 6.4, Quotienten der über die Bolometer gemessenen Widerstandsänderungen. Anhand der Änderung des  $VS$ -Wertes kann wie in Abbildung 43 gezeigt ist, die Änderung des Innendrucks und damit auch die der thermischen Leitfähigkeit (Gleichung (4.19)) und der Responsivität (Gleichung (4.2)) ermittelt werden. Daher wird hier im Weiteren der Parameter  $VS$  als Messwert des Vakuumsensors und als Maß der Responsivitätsänderungen verwendet.

Ein Vergleich der normierten Verläufe der Responsivität und der Messwerte des Vakuumsensors ( $VS$ ) bei einer thermischen Alterung von 125 °C zeigt (in Abbildung 43), dass beide die gleiche Degradation aufweisen. Damit zeigt sich, dass eine Reduzierung der thermischen Isolierung die Responsivität reduziert und diese sogar bestimmt. Mit diesem Verfahren wird ebenso die Degradation des TCR erfasst (siehe Gleichung (6.3)), so dass die gesamte Degradation gemessen werden kann. Zudem besitzt der Vakuumsensor eine bessere Wiederholgenauigkeit als der Bauelementetester. Folglich ist der Vakuumsensor bestens geeignet, die Performancedegradation zu messen.

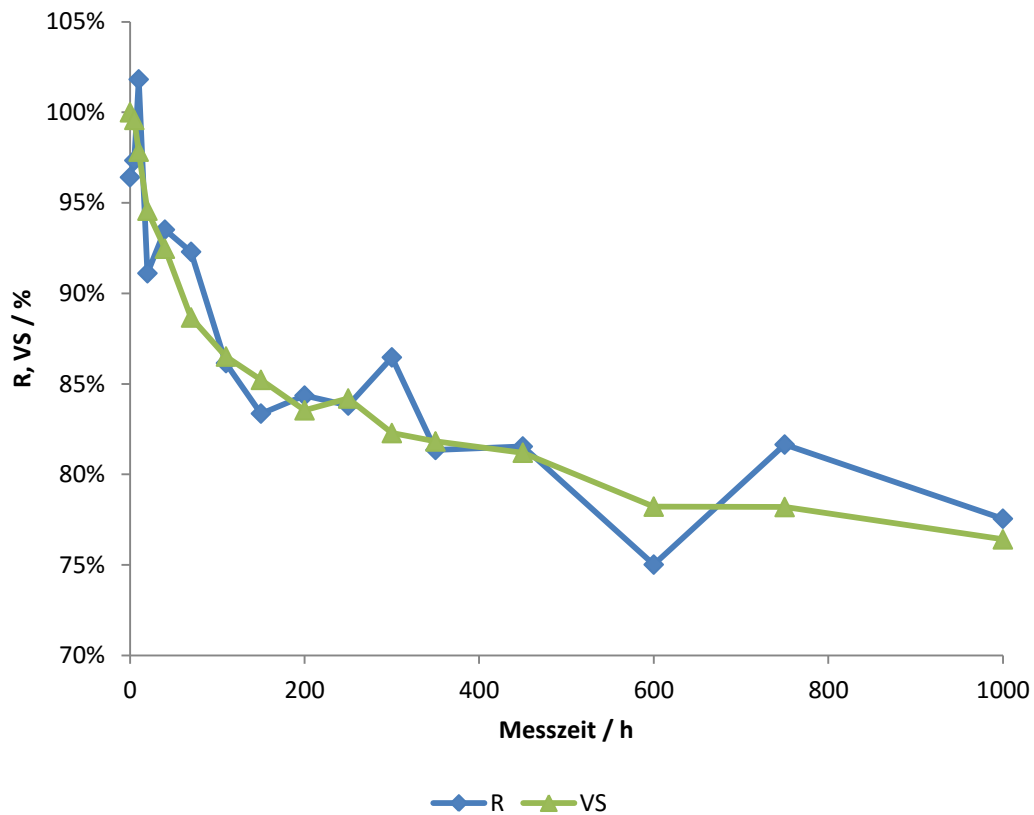


Abbildung 43: Messergebnisse der Responsivität  $R$  und des Vakuumsensor  $VS$  bei 125 °C HTSL in normierter Darstellung

### 5.1.5 Modellierung der Performancedegradation

Um ein berechenbares Modell für die Performancedegradation zu erzeugen, muss die Degradation  $\Delta R$  über Temperatur und Zeit mathematisch modelliert werden. Hierfür wurden die Infrarotsensoren bei verschiedenen Temperaturen ausgelagert und die Degradation über den Vakuumsensor  $VS$  gemessen.

Um das grundlegende mathematische Verhalten zu bestimmen wurde exemplarisch ein Fitting der Messwerte bei 125 °C durchgeführt (Abbildung 44).

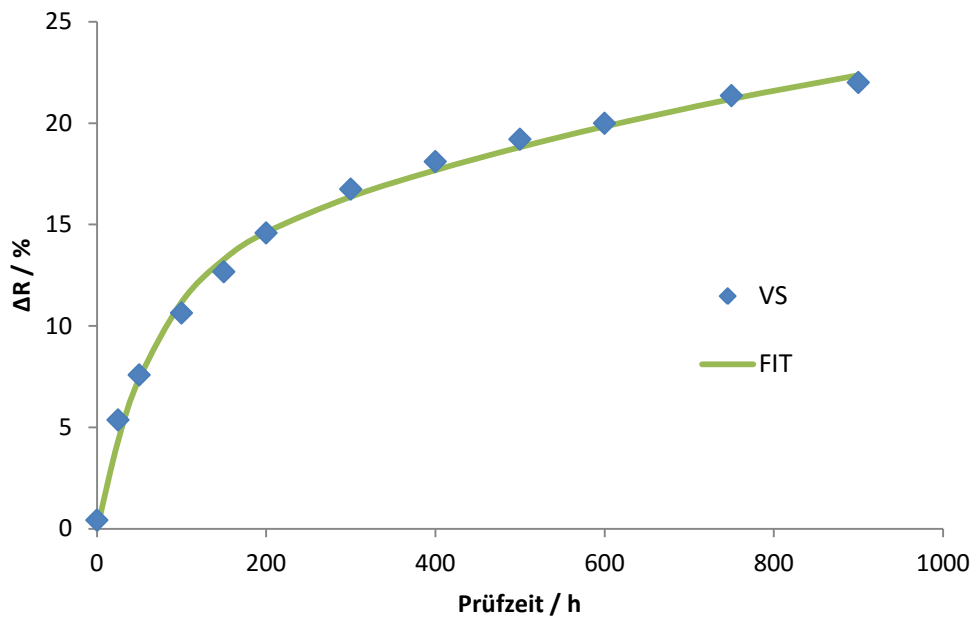


Abbildung 44: Fitting der Degradationsmessungen mit einer Exponentialfunktion 2. Ordnung

Gerade bei den hohen Temperaturen wird ein Verlauf mit zwei Anstiegen erkennbar. Daher wurde eine Exponentialfunktion zweiter Ordnung als Fit-Modell nach Gleichung (5.2) eingesetzt, mit der das Degradationsverhalten sehr gut modelliert werden kann. Hierbei kommen zwei Zeitkonstanten ( $\tau_{FIT\ 1}$  und  $\tau_{FIT\ 2}$ ) zum Einsatz, die temperaturabhängig sind.

$$y = y_0 + H_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{FIT\ 1}}\right) + H_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{FIT\ 2}}\right) \quad (5.2)$$

Um ein Modell zu erzeugen, mit dem man sowohl die Zeit wie auch Temperatur modellieren kann, muss der Temperatureinfluss bestimmt werden. Dafür werden Fittings für jede Temperatur durchgeführt und die Zeitkonstanten variabel gehalten, während die Verstärkungsfaktoren  $H_1$  und  $H_2$  sowie der Offset  $y_0$  konstant gehalten werden. Folgend werden aus den temperaturabhängigen Zeitkonstanten in Abbildung 45 die funktionalen Zusammenhänge analysiert.

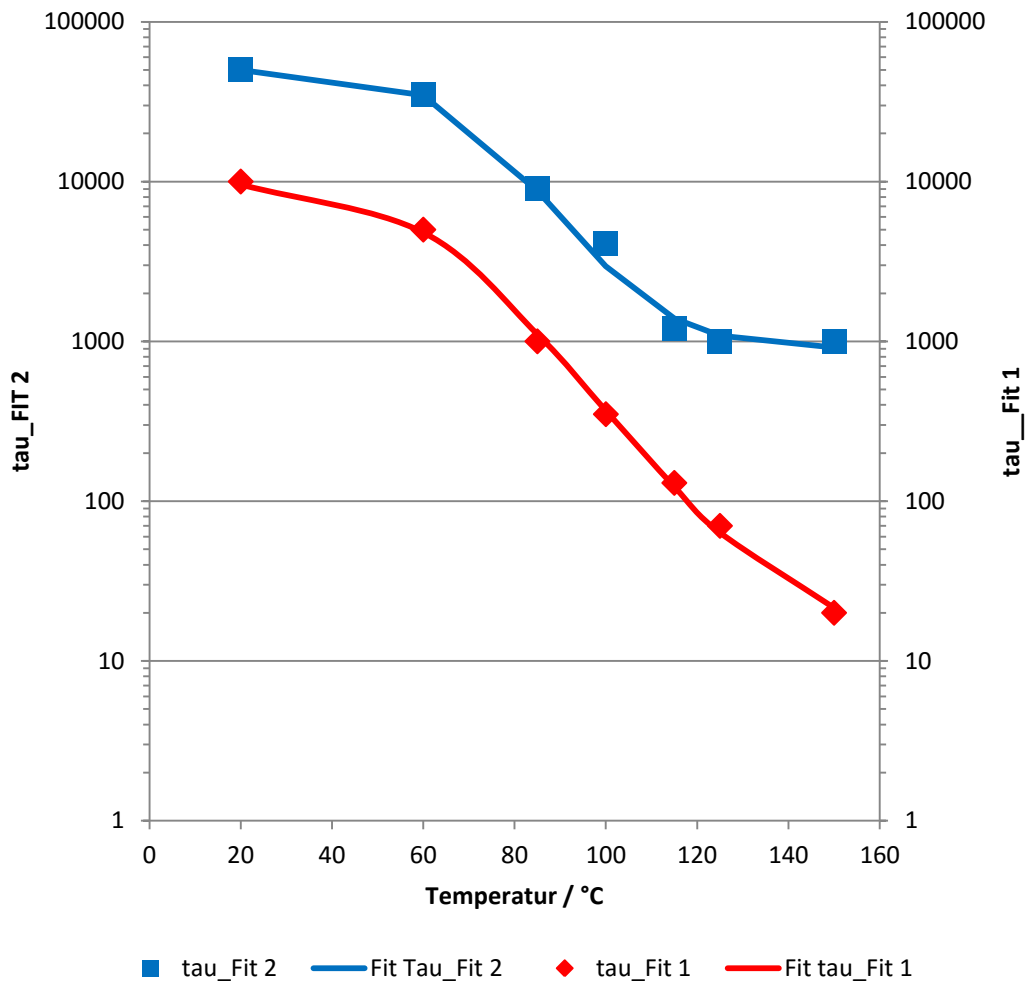


Abbildung 45: Modellierung der temperaturabhängigen Zeitkonstanten

Man erkennt, dass die Temperaturverläufe und der Anstieg nicht rein exponentiell sind. Bei hohen Temperaturen reduziert sich die Zeitkonstante  $\tau_{FIT\ 1}$  weiter und das Ausgasen in der Anfangsphase verläuft damit schneller. Die zweite Zeitkonstante  $\tau_{FIT\ 2}$ , und damit das Ausgasen über längere Zeit, gehen dagegen in Sättigung, womit sich das Ausgasen nicht unbegrenzt beschleunigt. Physikalische Ursache könnte sein, dass die oberflächennahen Gase gelöst und damit die verfügbare Gasmenge reduziert wird, während Gase aus tieferen Schichten über größere Zeiten weiterhin mit geringerer Geschwindigkeit ausgasen.

Ein lineares Modell ist somit ungeeignet und führt zu Fehlern. Daher wurde ein Fitting mit einer Sigmoidal-Funktion, nach Gleichung (5.3) durchgeführt, die diese Verhalten gut beschreiben kann.

$$y = S1 + \frac{S2 - S1}{1 + 10^{(\text{Log } x0 - T) * S3}} \quad (5.3)$$

Die über ein Fitting der Zeitkonstanten erzeugten Sigmoidal-Funktionen werden in Gleichung (5.2) eingefügt. Das für die hier durchgeführten Versuche ermittelte Degradationsmodell, ist in Gleichung (5.4) mit den Modellparametern dargestellt.

$$\begin{aligned} \Delta R = & 30 + 12 \cdot \exp\left(-\frac{t}{15 + \frac{10000 - 15}{1 + 10^{-0.035 \cdot (59 - T)}}}\right) \\ & + 18 \cdot \exp\left(-\frac{t}{900 + \frac{50479 - 900}{1 + 10^{-0.04 \cdot (67.8 - T)}}}\right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Zur Verifizierung des Modells, werden die gemessenen Degradationswerte bei verschiedenen Temperaturen und den entsprechenden Modellergebnissen zusammen in Abbildung 46 dargestellt.

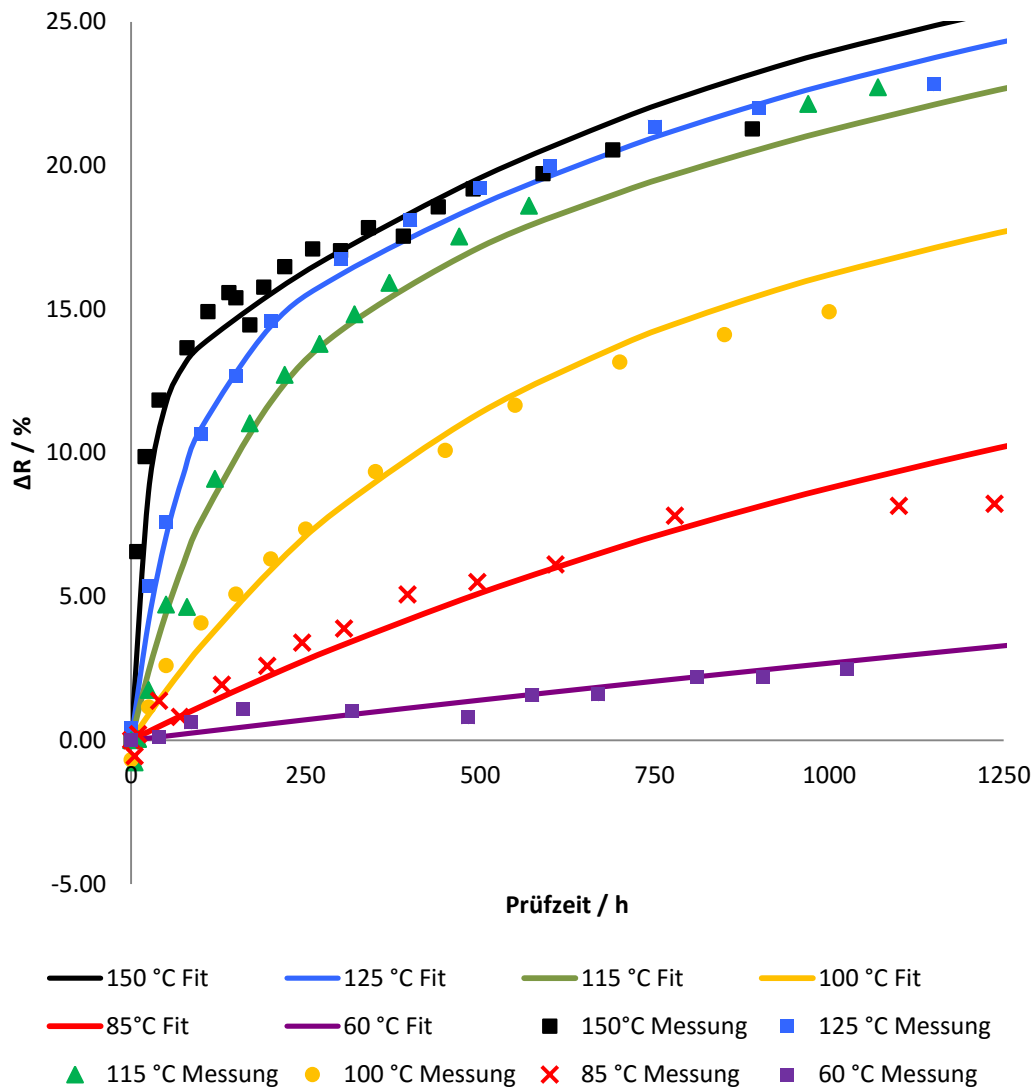


Abbildung 46: Vergleich des Degradationsmodells (Linien) mit den Messwerten (Punkten) bei verschiedenen Temperaturen über die Zeit

Das Modell funktioniert und zeigt eine gute Übereinstimmung mit den realen Messwerten. Es ergeben sich aber auch einige Ungenauigkeiten, die aus der Vereinfachung des Modells mit konstanten Verstärkungsfaktoren, aus Fitting- Ungenauigkeiten und vor allem den Bauteilstreuungen resultieren. Denn Grundlage hierfür ist jeweils ein Bauelement pro Temperatur. Für genauere Modelle müsste eine größere Zahl an Sensoren gealtert werden.

Das hier entwickelte Degradationsmodell berücksichtigt die Sättigung des Anstieges bei hohen Temperaturen und ermöglicht auch eine Umrechnung auf tiefere Umgebungsbedingungen, wie sie in der Applikation bei Lagerung unter Raumtemperatur vorkommen. In Tabelle 15 werden die über vier Sensoren gemittelten Messungen mit den Modellberechnungen verglichen. Die Modellergebnisse liegen nahe bei den realen Messwerten und zeigen, dass das Modell auch bei niedrigeren Temperaturen angewendet werden kann. Die Abweichungen sind gering und ergeben sich aus den oben genannten Gründen.

Tabelle 15: Vergleich der Degradation bei 20 °C zwischen Messwerten und Modellberechnungen nach einem Jahr

Zeit / h	$\Delta R$ -Messung / %	$\Delta R$ -Modell / %
8760	9.8	10,07
4380	5.5	5,90

### 5.1.6 Optimierung der Vakuumlebensdauer

Da die Erhöhung des Innendrucks die Performance über die Lebensdauer reduzieren, müssen Maßnahmen getroffen werden, die diesen Effekt abschwächen.

Eine Möglichkeit ist die Reduzierung der Ursache, also der Einlagerung von Gasen oder organischen Verbindungen im Herstellungsprozess. Dies ist jedoch stark abhängig von den spezifischen Herstellungsprozessen. Es wird aus praktischer Sicht schwer werden, diese so zu optimieren, dass das Ausgasen minimiert wird.

Eine praktikable Methode ist das bewusste Vorausgasen der Wafer, vor dem Verlöten der Packages. So kann das Ausgasen großer Gasmengen durch eine Auslagerung bei hohen Temperaturen im Vakuum schon vor der Verkapselung erfolgen und die Ausgasrate der gefertigten Sensoren reduziert werden. Alternativ könnten die Sensoren auch im gefertigten Zustand thermisch ausgelagert werden. Man kann somit das schnelle Ausgasen am Anfang beschleunigen. Die



Responsivität wäre somit zwar kleiner, jedoch wird die Degradationsrate im Einsatz verringert.

Eine weitere Möglichkeit ist die Reduzierung der Auswirkungen der Gase, indem das Package-Volumen erhöht und damit die Degradation der Performance verringert wird, da der Druck mit der Anzahl an Molekülen nicht so schnell steigt. Nach Gleichung (4.25) bedeutet eine Vergrößerung des Volumens um z. B. Faktor 10 einen zehnfach kleineren Innendruck. Dies kann mit einer zusätzlichen Aushöhlung des Deckelwafers erfolgen, indem eine zusätzliche Kavität in den Deckel geätzt wird (Abbildung 47). Ohne diese Aushöhlung wird das Kavitätvolumen nur von der Höhe des Lötrahmens bestimmt (linkes Bild (1) in Abbildung 47).

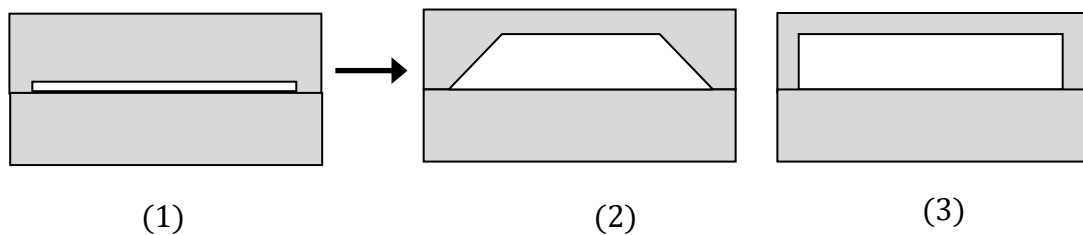


Abbildung 47: Vergrößerung der Package-Kavität durch Deckelätzungen, (1) Deckel ohne Aushöhlung, (2) Deckel mit trapezförmiger Aushöhlung, (3) Deckel mit quadratischer Aushöhlung

Weiterhin sollten die Zusammensetzungen der Getter-Materialien mit den Temperaturen des Package-Lötprozesses abgestimmt werden, damit der Getter auch aktiviert wird und die freigesetzten Gase aufnehmen kann. Dies wäre nicht der Fall, wenn die Aktivierungstemperatur des Getters über der Prozesstemperatur liegt.

Ein Vorteil wäre es, den Getter elektrisch kontaktieren zu können, damit er somit möglichst lokal jouleisch erwärmt werden kann. So könnte der Getter auch im aufgebauten Zustand aktiviert werden und den Innendruck senken ohne den ganzen Sensor erwärmen zu müssen.

## 5.2 Lebensdauermodell

### Arrhenius Modell

Die in dieser Arbeit vorgestellten Fehlermechanismen sind stark temperaturabhängig. Die Temperatur führt zu einer Beschleunigung der Fehlermechanismen und damit zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Einen Zusammenhang zwischen Temperatur  $T$  und Ausfallrate  $\lambda$  beschreibt das Arrhenius-Modell. Dieses stammt ursprünglich aus der chemischen Kinetik und beschreibt dort die Reaktionsgeschwindigkeitszeitkonstante. Neben der Boltzmann Konstante  $k = 8,63 \times 10^{-5}$  eV/K, werden ein Modellparameter  $A$  und die Aktivierungsenergie  $E_a$  benötigt.

$$\lambda = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k T}\right) \quad (5.5)$$

Der Beschleunigungsfaktor  $A_f$  zwischen den Temperaturen der Applikation ( $T_1$ ) und den Zuverlässigkeitsprüfungen ( $T_2$ ) berechnet sich nach folgender Formel [50].

$$A_f = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (5.6)$$

Zu beachten ist, dass Arrhenius-Gleichungen konstante Fehlerraten voraussetzen, die in der Realität jedoch selten tatsächlich konstant sind. Trotzdem werden in der allgemeinen Praxis konstante Fehlerraten angewendet. Die Firma Analog Devices [118] gibt in Ihrem Zuverlässigkeitshandbuch dagegen an, dass sie die Fehlerraten nicht für jeden Fehlermechanismus berechnen, sondern standardmäßig den Wert 0,7 eV verwenden.

Die folgende exemplarische Berechnung des Beschleunigungsfaktors verwendet 115 °C als Alterungstemperatur des HTOL, 3000 h absolvierte Testzeit und 0,7 eV für die Aktivierungsenergie.

---

$A_f(20\text{ °C}) = 871$	$871 * 3000\text{ h} = 2\,613\,000\text{ h} = 298\text{ Jahre}$
$A_f(30\text{ °C}) = 350$	$350 * 3000\text{ h} = 1\,050\,000\text{ h} = 120\text{ Jahre}$
$A_f(60\text{ °C}) = 31$	$31 * 3000\text{ h} = 93\,000\text{ h} = 10,6\text{ Jahre}$

Beschleunigungsfaktoren und damit Lebensdauern hängen stark von den Applikationstemperaturen ab. Bei niedrigen Temperaturen, wie bei einer Lagerung oder im nicht aktiven Zustand, ergeben sich sehr hohe Beschleunigungsfaktoren, die auch entsprechend zu sehr hohen potentiellen Lebensdauern führen. Selbst bei hohen Temperaturen von 60 °C würde noch eine potentielle Lebensdauer von mindestens 10 Jahren Dauerlast berechnet werden.

Wichtig zu bemerken ist, dass hier nur systematische Abschätzungen und keine statistischen getroffen werden können. Die tatsächlichen Ausfallraten und Lebensdauern sind hersteller- und prozessabhängig, müssen statistisch erfasst werden und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Es wurde jedoch gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit geprüften Infrarotsensoren des Fraunhofer IMS eine sehr hohe Lebensdauer erreichen können und keine designbedingten Schwächen aufzeigen.

### 5.3 Strombelastungsprüfung

Um den Einfluss der Strombelastung und Elektromigration auf die Bolometer zu untersuchen, wurden die kritischsten stromführenden Strukturelemente über speziell gefertigte Teststrukturen geprüft. Diese bestehen aus Via-Ketten, mit 130 in Reihe geschalteten Bolometer-Vias, Leitbahnen, deren Geometrie der Bolometerleitbahnen entsprechen und kontaktierbaren Einzelbolometern. Diese Strukturen lassen sich direkt kontaktieren und deren elektrischen Widerstand messen.

Belastet werden diese Strukturen bei drei verschiedenen Stromdichten, siehe Tabelle 16. Im Gegensatz zu standardisierten Elektromigrationsprüfungen er-

folgt die Beschleunigung hierbei nicht zusätzlich durch hohe Temperaturen, sondern durch reine Testzeit und erhöhte Stromdichte. Erreicht wird dies, indem die Strukturen dauerhafter Strombelastung anstatt dem Pulsbetrieb im IRFPA ausgesetzt sind. Damit ergibt sich eine Beschleunigung um den Faktor der Auslesefrequenz des Bolometers, die vom Konzept des ROIC abhängig ist. Bei einer Testzeit von 889 h und einem berechneten Beschleunigungsfaktor der hier verwendeten IRFPAs von 112 ergibt sich somit eine Lebensdauer von 99.568 h = 11,36 Jahren. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Beschleunigung nur von der Zeit und Stromdichte abhängt und nicht noch zusätzlich von der Temperatur.

Tabelle 16: geprüfte Stromdichten und deren Verhältnis zur Applikationsstromdichte  $J_0$

	Stromdichte $J$ (A/m <sup>2</sup> )	$J_n/J_0$
Applikation = $J_0$	2,14E+08	1
Stufe J1	4,29E+08	2
Stufe J2	1,20E+09	5,61
Stufe J3	1,00E+10	46,7

Zur Prüfdurchführung wurden spezielle Belastungsboards entwickelt, bei denen jede Struktur mit einem speziell bestimmten Vorwiderstand und mehreren Versorgungsspannungen auf die jeweilige Stromdichte  $J_n$  gebracht wurde. Dabei wurden pro Belastungsstufe  $J_n$ , jeweils drei Via-Ketten, drei Leitbahnen und sechs Einzelbolometer getestet. In den zeitdiskret nach 0 h, 96 h, 192 h, 384 h, 576 h, 691 h und 889 h durchgeführten Prüfschritten, wurde der elektrische Widerstand der Strukturen bei 30,0 °C vermessen, um den Einfluss durch schwankende Umgebungstemperaturen auf das Messergebnis zu verringern.

Tabelle 17: Widerstandsänderungen bei den Strombelastungstests

Belastungsstufe	Struktur	$\Delta R(t=889 \text{ h}) / \%$	Std / %
J1	Via-Kette	0.02	0.02
	Leitbahn	0.07	0.03
	Bolometer	-0.90	0.71
J2	Via-Kette	0.17	0.12
	Leitbahn	-0.09	0.05
	Bolometer	0.70	1.53
J3	Via-Kette	3.86	1.30
	Leitbahn	0.06	0.03
	Bolometer	x	0.02

Eine Analyse der Messwerte, die in Tabelle 17 zusammengefasst wurden, zeigt keine signifikanten Erhöhungen des Widerstandes auf den Strombelastungsstufen J1 und J2. Zudem liegen die Änderungen des Widerstandes im Bereich der Standardabweichung und damit der möglichen Messgenauigkeiten. Bei der fast 50-fach höheren Stromdichte auf Stufe J3 kommt es zu einem geringen Anstieg um ca. 4 % bei den Via-Ketten, was ein Anzeichen für Elektromigrationsschäden sein kann. Die Einzelbolometer haben diese Strombelastung nicht überlebt und sind sofort ausgefallen, da die thermische Belastung zu hoch war.

Beschleunigungsfaktoren können hierbei nicht bestimmt werden, da es keine Ausfälle oder berechenbare Degradationen bei verschiedenen Stromdichten gibt. Da die Strukturen aber sogar eine fast 50-fach erhöhte Strombelastung ohne deutliche Degradationen überlebt haben, ist die Lebensdauer bedeutend höher als 11 Jahre.

Bei den HTOL Prüfungen an Sensoren, den Strombelastungsprüfungen an Teststrukturen und den theoretischen Voruntersuchungen (Kapitel 4.2.1) konnte kein schädigender Einfluss durch die Strombelastung ermittelt werden.

## 5.4 Prüfung des Package

Das Package muss robust gegen mechanische und thermomechanische Belastungen in der Applikation sein. Eine beschleunigte Alterung über Vibrationsprüfungen und thermische Zyklen prüft die Zuverlässigkeit und vor allem die Hermitezität des Packages. Die Ergebnisse wurden in Tabelle 18 zusammengefasst.

Die Vibrationsprüfungen bei 20 G überstanden die Prüflinge zweimal hintereinander, ohne eine Veränderung der Responsivität oder Pixeldefekte zu zeigen.

Die thermischen Zyklen wurden mit zunehmenden Stressniveaus durchgeführt, da die CSPs keine Ausfälle zeigten. Die auf Platine aufgebauten Infrarotsensoren können nur bis +150 °C geprüft werden, da sie sonst sofort elektrisch defekt werden. Eine weitere Erhöhung der Temperatur ist nur mit reinen CSPs möglich. Die CSPs überstanden auch das höchste Prüfniveau von -65 °C / +175 °C ohne einen Ausfall nach 1000 Zyklen. Eine weitere Erhöhung der Temperatur auf 200 °C war nicht möglich, da es auch hier sofort zu einem elektrischen defekt kommt.

Tabelle 18: Ergebnisse der Zuverlässigkeitsprüfungen am Package

Prüfung	Stresslevel	Dauer	Ergebnis
TC	-50 °C / +150 °C	BE + CSP: 1000 Zyklen	Kein Fehler ✓
	-65 °C / +175 °C	CSP: 1000 Zyklen	Kein Fehler ✓
Vibration	20 G	BE: 2 x Prüfung	Kein Fehler ✓
Mech. Schock	500G / 1 ms	5x in 6 Richtungen	Kein Fehler ✓
Feuchtigkeit	121 °C / 100 %	CSP: 264 h	Kein Fehler ✓
		BE: 192 h, 240 h	Defekt x

Weder die hohe Zahl an mechanischen Vibrationszyklen noch die hohen Dehnungen der thermischen Zyklen bei Temperaturschwankung von bis zu 240 K führten zu einem Verlust der Dichtigkeit. Diese Prüfungen liegen von ihrer Belastung sehr weit über den typischen Applikationsbelastungen und bilden da-

mit einer stark beschleunigten Alterung. Da trotz dessen keine Fehler auftraten, kann man dem Package eine sehr hohe Zuverlässigkeit ausweisen.

Zusätzlich wurden Feuchtetest bei 121 °C und 100 % RH durchgeführt. Bei der Prüfung von auf Platinen aufgebauten Infrarotsensoren kam es erst nach jeweils 240 h und 192 h zu einem Ausfall, in Form eines elektrischen Defekts. Reine CSPs ohne Platine funktionierten aber auch nach 264 Stunden noch ohne Fehler. Dies bestätigt, dass Feuchtigkeit keinen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Infrarotsensors hat. Das schwächere Glied hierbei ist die Platine, die eher ausfällt als der Sensor.

Eine weitere Quantifizierung der Zuverlässigkeit kann nicht erfolgen, da es zu keinen Ausfällen kam. Zudem können dadurch keine Zuverlässigkeitsmodelle gebildet werden.

Das Package zeigt sich sehr widerstandsfähig und ermöglicht damit eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten auch unter harten Umgebungsbedingungen.

Zuverlässigkeitsprüfungen zu eutektischen Au-Sn-Verbindungen wurden nach [64] auch in anderen Quellen wie: [119], [120], [121], [122] und [123] untersucht. Dabei wurden thermische Zyklen, Temperaturlagerung, Dampfdruck und Scherversuche durchgeführt. Die Fehlerquellen entstehen durch Defekte im Herstellungsprozess, wie Poren, irreguläre Phasenbildung oder schwache Grenzflächen. Diese Defekte begünstigen eine Rissinitiierung.

#### **5.4.1 Coffin-Manson Modell**

Ermüdungseffekte, die durch hohe mechanische Lastwechselzyklen hervorgerufen werden, können durch die Coffin-Manson Gleichung [50] beschrieben werden.

$$N_f = A_{CM} \cdot \left( \frac{1}{\Delta \varepsilon_p} \right)^{B_{CM}} \quad (5.7)$$

$N_f$	Zyklenzahl bis Ausfall
$A_{CM}$	materialabhängige Konstante (Metalle -0,5 bis -0,7)
$\Delta \varepsilon_p$	plastische Dehnung
$B_{CM}$	empirische bestimmte Konstante

Dieses Modell kann sowohl auf duktile Materialien, die durch plastische Verformungen dominiert werden, als auch auf spröde Materialien, bei denen die Schädigungen durch Rissbildung und Rissausbreitung erfolgen, angewandt werden [124] [125]. Der Beschleunigungsfaktor  $A_f$  berechnet sich aus dem Temperaturwechsel der Prüfbelastung  $\Delta T_{Stress}$  im Verhältnis zu der Applikationsbelastung  $\Delta T_{App}$  und einem materialabhängigen Exponenten  $C_{CM}$  wie folgt:

$$A_f = \left( \frac{\Delta T_{Stress}}{\Delta T_{App}} \right)^{C_{CM}} \quad (5.8)$$

Tabelle 19: Modellparameter Coffin Manson Modell [50]

Material	$C_{CM}$
duktiler Metalle, Lote	1-3
Metalllegierungen / intermetallische Verbindungen	3-5
Spröde Brüche (Silizium und Dielektrika: $SiO_2$ , $Si_3N_4$ )	6-9

Eine Berechnung hiernach ist schwierig, da der Exponent nicht bekannt ist und auch nicht experimentell ermittelt werden konnte, aber einen entscheidenden Einfluss auf die berechnete Lebensdauer hat. Da der Bruch an der Grenzschicht zwischen Lotmaterial und Silizium vermutet wird, wird exemplarisch ein Wert von 5 gewählt.



$$A_F(30\text{ K}) = \left(\frac{240}{30}\right)^5 = 32768 \quad A_F(60\text{ K}) = \left(\frac{240}{60}\right)^5 = 1024$$

Folglich ergeben sich auch aufgrund der großen Differenz zwischen Prüfbedingung und realistischen Temperaturschwankungen sehr hohe Beschleunigungsfaktoren. Da die Prüfung mit 1000 Zyklen erfolgte, berechnen sich hieraus für die Applikation über 32 Mio. Zyklen bei  $\Delta T_{\text{App}} = 30\text{ K}$  und über 1 Mio. Zyklen bei 60 K. Man erkennt hierbei die hohe Zuverlässigkeit des Chip-Scale-Packages, das nahezu jedes Anwendungsszenario abdecken und die Lebensdauer nicht limitieren sollte.

#### 5.4.2 Prüfung der Festigkeit

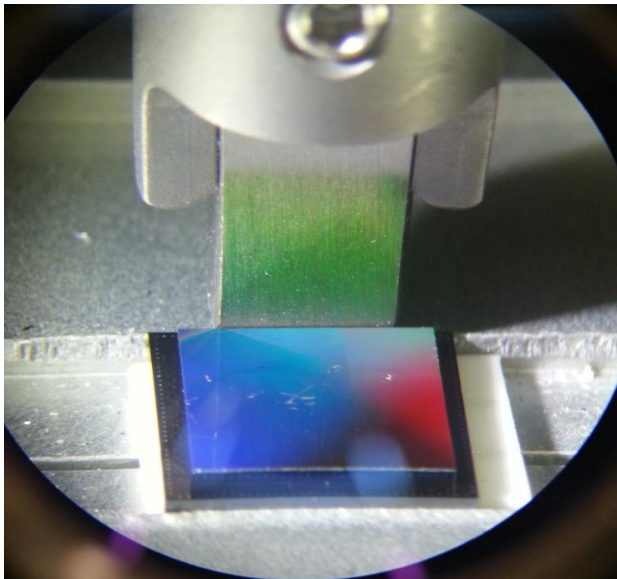


Abbildung 48: Deckelschertest am Package

In Scherversuchen wurde die Festigkeit von jeweils gealterten und nicht gealterten CSPs gemessen. Hierfür wurde mit einem Schertestsystem ein Meißel neben dem Deckel angesetzt (Abbildung 48) und bis zum Bruch geschert. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 20 zusammengefasst. Angegeben werden die Mittelwerte über 5 Prüflinge pro Prüfung. Man erkennt eine Verrin-

gerung der Scherkraft und damit der Festigkeit über eine Alterung mit thermischen Zyklen und bei Temperaturlagerung. Allerdings reduziert sich die Festigkeit um ca. 18 % über 1000 Zyklen und  $\Delta T_{\text{Stress}} = 200 \text{ K}$ . Die thermische Lagerung bei  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  führte zu einer Reduktion der Festigkeit von 12 % im Mittel.

Tabelle 20: Ergebnisse der Deckelschertests

Prüfung	Stress	Zyklenzahl	Scherkraft / kg	rel. Scherkraft
Start			38,6	100 %
TC	-50 °C / +150 °C	250x	34,4	89 %
TC	-50 °C / +150 °C	1000x	31,6	82 %
HT	150 °C	1700 h	33,8	88 %

### 5.4.3 Untersuchung des Lötrahmens

Im Folgenden wird der Lötrahmen genauer analysiert, um mögliche Alterungseffekte erkennen und eine Schwächung der Festigkeit erklären zu können. Hierfür wurden CSPs erst im Querschnitt mechanisch geschliffen, poliert und zusätzlich mit einem Ionenstrahl poliert. Die so erzeugten Querschnitte sind somit rein und möglichst frei von mechanischen Präparationsartefakten wie Verschmieren oder Riefen. Die Proben wurden anschließend im REM (Rasterelektronenmikroskop) auf Fehler untersucht.

Für die Versuche wurden CSPs mit Au-Sn Lötrahmen exemplarisch aufgebaut. Die analysierten metallischen Schichten der unbelasteten Probe sind in Abbildung 49 dargestellt. Dem entgegen steht ein durch thermische Zyklen gealterter Lötrahmen in Abbildung 50, bei dem es zu einer massiven Porenbildung zwischen der Nickelschicht und dem Eutektikum kommt. Dies passt zu den theoretischen Voruntersuchungen, da diese sogenannten Kirkendall-Poren nach [44] die Scherfestigkeit verringern.

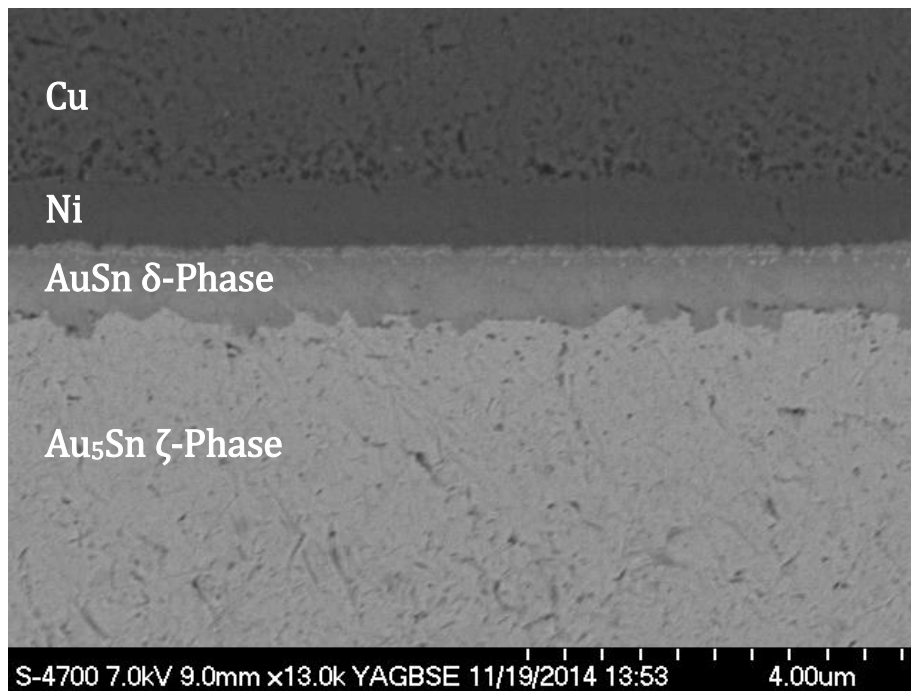


Abbildung 49: Metallinterface eines nicht gealterten exemplarisch aufgebauten Au-Sn Löttrahmens im Querschnitt

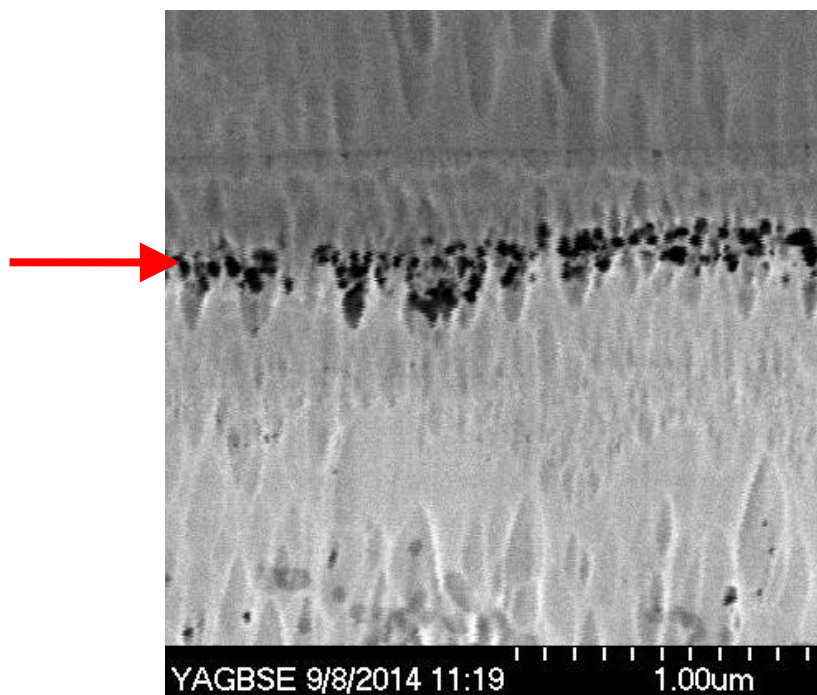


Abbildung 50: Bildung von Poren zwischen Nickel und AuSn nach Alterung bei TC: -50 °C / +150 °C für 1000 Zyklen

Diese Porenbildung resultiert aus den unterschiedlichen Diffusionseigenschaften der Metalle. So zeigen die EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) Messungen in Abbildung 51, dass Nickel in das Eutektikum hinein diffundiert, während Gold und Zinn nicht in die Nickelschicht diffundieren. Die Folge ist die Bildung von Poren im Nickel und eine schwächeren Verbindungsfläche.

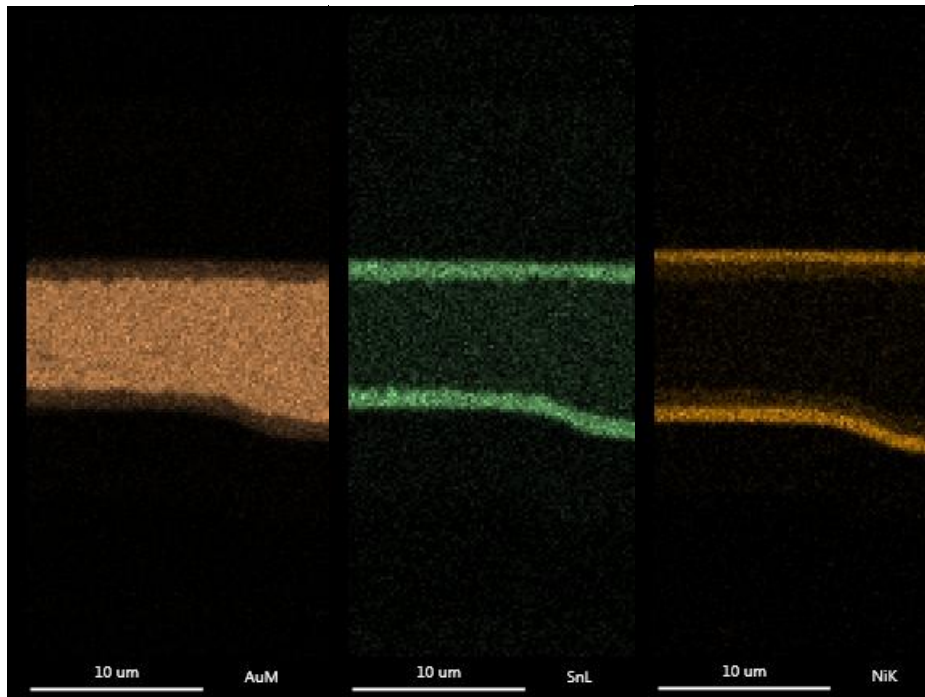


Abbildung 51: EDX-Mapping des Löttrahmens, links Gold, Mitte Zinn, rechts Nickel

Weiterhin lassen sich Schäden im Löttrahmen beobachten, die voraussichtlich über die Alterung hervorgerufen werden. Abbildung 52 zeigt die Bildung von Rissen am äußeren oberen Rand des Packages. Hierbei bilden sich die Risse zwischen der Saat-/Haftschicht und dem Löttrahmen. Dies könnte aus dem Stress der thermischen Zyklen resultieren. Die hier detektierten Risslängen von wenigen  $\mu\text{m}$  sind allerdings im Verhältnis zur Gesamtbreite des Löttrahmens klein. Damit ist dieser Fehlermechanismus unkritisch, muss aber überprüft werden.

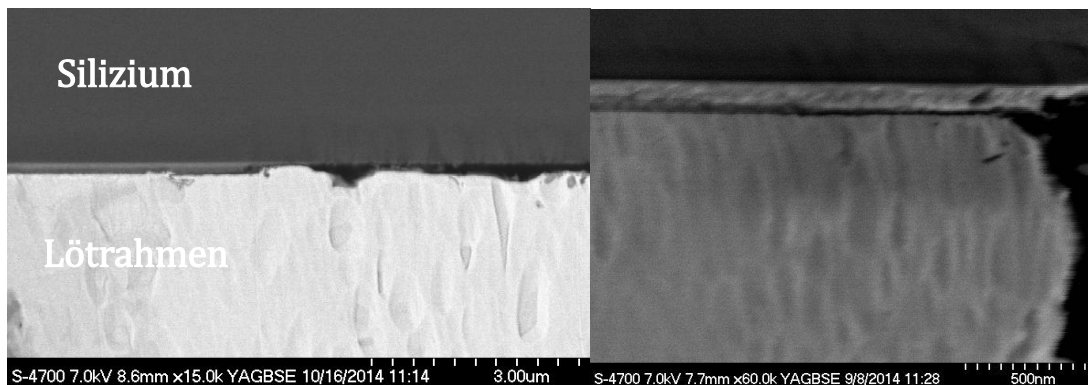


Abbildung 52: Rissbildung am Rande des Lötrahmens zwischen Saatschicht / Haftschicht und Lötrahmen

Eine zweite Schädigung ist vereinzelt auf der Passivierung neben dem Lötrahmen auf der Außenseite sichtbar (Abbildung 53). Passend zu den theoretischen Untersuchungen in Kapitel 4.3 und auch wie in [14] beschrieben, können durch den Stress der thermischen Zyklen oder durch den Herstellungsprozess Risse in der Passivierung entstehen. Wie hier zu sehen ist, könnten damit im schlimmsten Fall auch Metallebenen unter der Passivierung beschädigt und Kurzschlüsse erzeugt werden. Zudem wären die Risse auch ein Angriffspunkt für Korrosion.

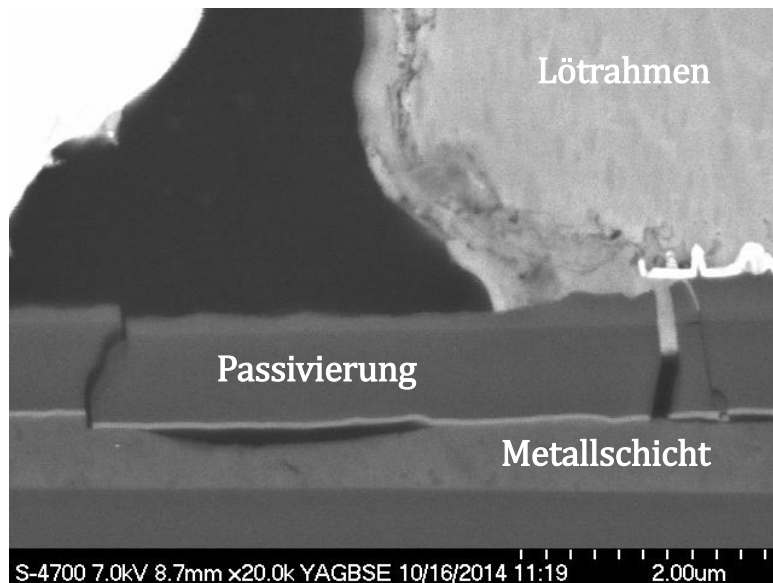


Abbildung 53: Schäden der Passivierung und der darunterliegenden Leitbahnen durch Kräfte und Risse an der Außenseite des Lötrahmens

#### 5.4.4 FEM-Simulationen des CSPs

FEM-Simulationen bieten die Möglichkeit, das Package zu modellieren und wirkende Kräfte durch Umwelteinflüsse zu simulieren. Damit können potentielle Fehlerstellen detektiert und mit den Untersuchungsergebnissen verglichen werden. Folgende Einflüsse werden simuliert:

- a) Kräfte durch den Innendruck im Package
- b) Mechanische Belastungen
- c) Thermomechanische Belastungen

##### a) Simulation mech. Kräfte durch Innendruck:

Der Unterdruck im Package führt zu Spannungen und damit zu einer Verformung des Packages. Da bei den hier untersuchten CSPs der Abstand zwischen dem Deckelchip und Substratchip durch den Lötrahmen definiert wird, bestimmt dessen Dicke von hier beispielhaft simulierten 15  $\mu\text{m}$  das Package-Volumen und die erlaubte Durchbiegung.

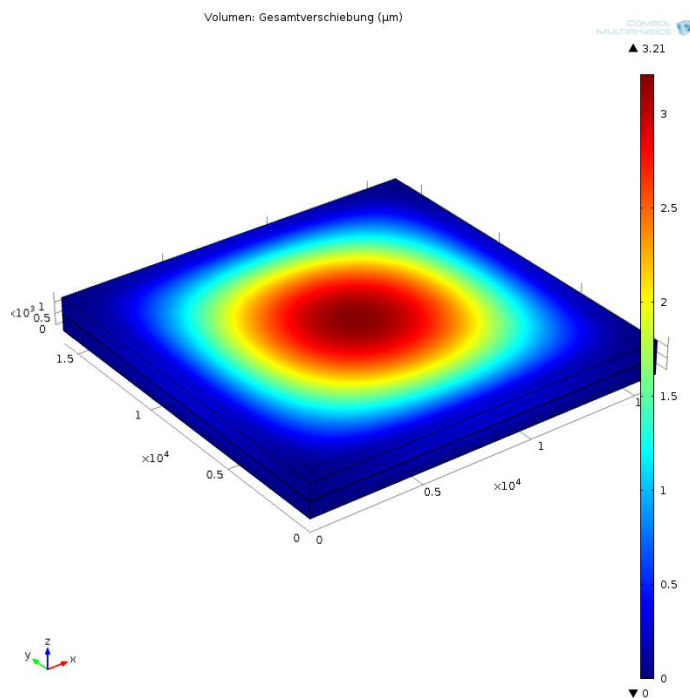


Abbildung 54: simulierte Durchbiegung eines VGA-CSP durch den Innendruck

Die resultierende Durchbiegung des Chips wurde für verschiedene Package-Größen entsprechend verschiedener Imager-Größen simuliert. Wie in Abbildung 54 zu sehen ist, ist die Durchbiegung in der Deckelmitte am größten und darf nicht so groß werden, dass es zu einem Kontakt mit den Bolometern kommt. Für die Simulation wurden zwei 725  $\mu\text{m}$  dicke Siliziumchips gewählt, die ein Elastizitätsmodul von 170 GPa, eine Poissonzahl von 0,28 und eine Dichte von 2329  $\text{kg}/\text{m}^3$  besitzen.

Tabelle 21: Ein Vergleich der Durchbiegung eines Chips durch den Innendruck bei verschiedenen Packagegrößen

Imagergröße	simulierte Abmaße	Pixelfeld	Simulierte Durchbiegung
QVGA	8 x 8 mm	320 x 240	0,22 $\mu\text{m}$
VGA	16 x 16 mm	640 x 480	3,29 $\mu\text{m}$
XGA	32 x 32 mm	1024 x 768	45,0 $\mu\text{m}$

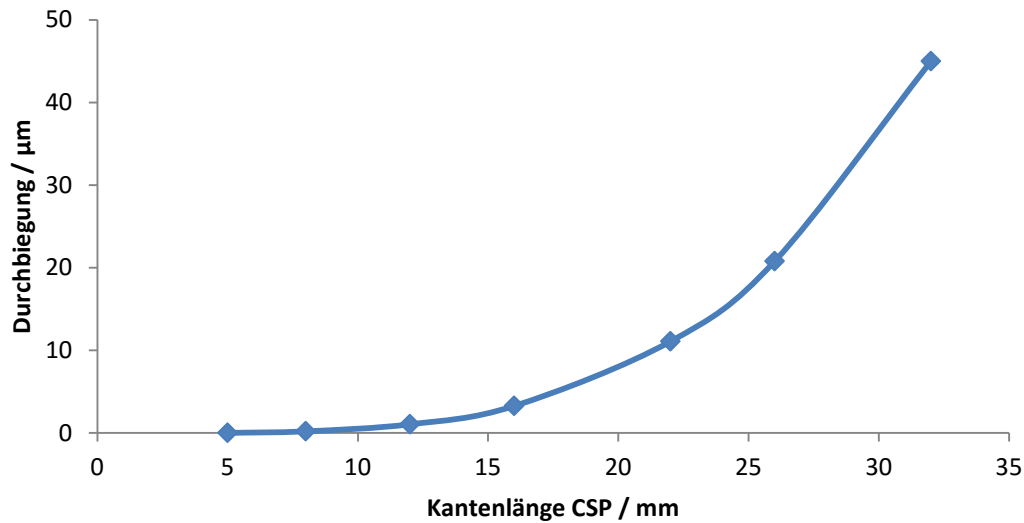


Abbildung 55: Deckeldurchbiegung aufgrund des Innendrucks bei verschiedenen Package- / Imager-Größen

Zu beachten ist hierbei, dass die Durchbiegung sowohl beim Deckelchip als auch beim Substratchip wirkt. Bei einer ungefähren Höhe der Bolometer von 2  $\mu\text{m}$  und einer Rahmenhöhe von 15  $\mu\text{m}$ , kann eine Verbiegung von 6,5  $\mu\text{m}$  pro Chip die Bolometer zerstören. Dies wäre der Fall, wenn das hier simulierte Package eine Seitenlänge von 20 mm hätte. Damit muss die Durchbiegung beim Package-Design berücksichtigt werden, um Ausfälle zu verhindern.

Die durch den Innendruck wirkenden Kräfte fokussieren sich hierbei an dem Löttrahmen. Dabei treten Von-Mises-Spannungen von  $1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$  am Inneren des Lötrahmens auf (Abbildung 56), die zu Rissbildungen oder Delamination führen können. Ein Grenzwert für diese maximal zulässige Spannung lässt sich aber nicht bestimmen, da die Auswirkungen von der mikrostrukturellen Verbindung, der Materialbeschaffenheit und der Bindungsstärke der Schichten des Lötrahmens abhängen.



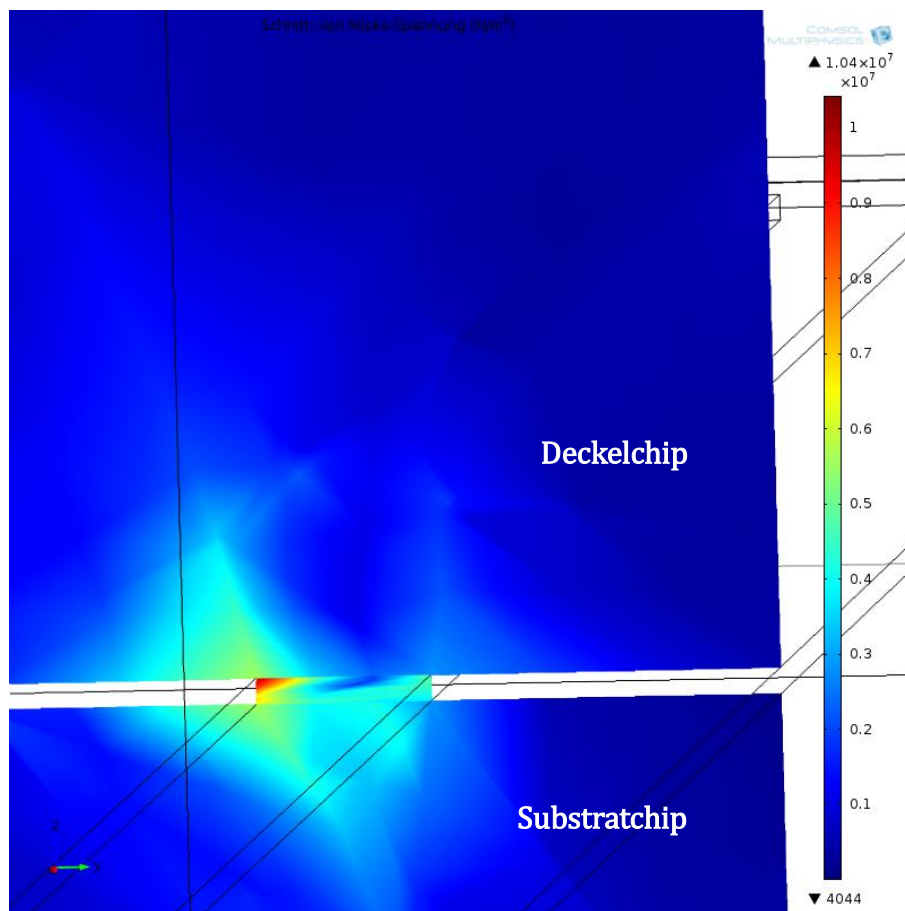


Abbildung 56: Von-Mises-Spannung durch Innendruck gezeigt am Querschnitt eines 3D-Modells (inklusive perspektivischen 3D-Konstruktionslinien in Schwarz) des Chips fokussieren sich am inneren Lötrahmen zum Deckel hin

### b) Mechanische Belastung

Eine Analyse mit einem zweidimensionalen Modell des Lötrahmens mit dem mehrschichtigen metallischen Aufbau des Lötrahmens (Abbildung 57) zeigt bei einer Beschleunigung von 1000 G eine maximale Von-Mises-Spannung von bis zu  $1,35 \cdot 10^8$  N/m<sup>2</sup>. Die Materialspannungen fokussieren sich am oberen Rand des Lötrahmens bei der Saat-/Haftschrift. Diese hohen punktuellen Kräfte begünstigen das Risswachstum und können zum Ausfall führen. Dies passt gut zu den realen Rissbildungen in Abbildung 52, bei denen an genau diesen Stellen Risse zu sehen sind.

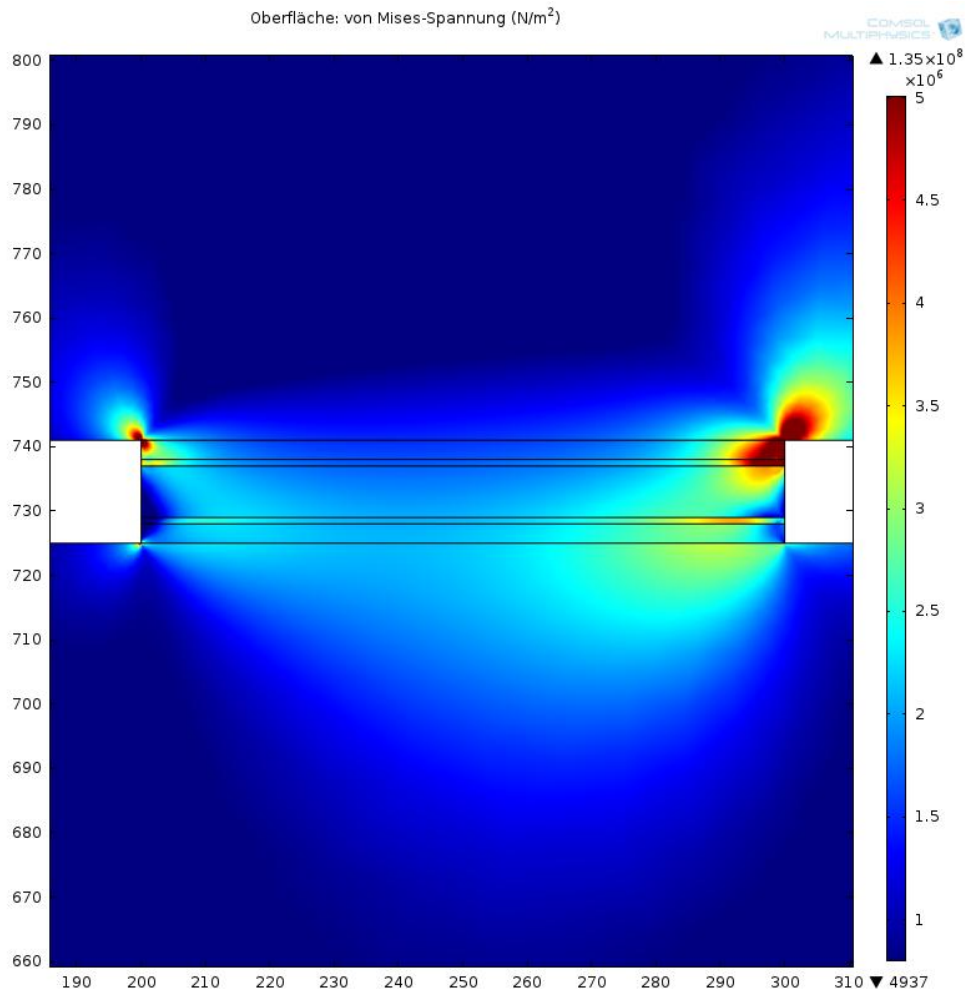


Abbildung 57: farbskalierte Von-Mises-Spannung eines simulierten 2D Lötrahmens mit den metallischen Schichten des Lötrahmens, bei Beschleunigung von 1000 G in Y-Achse

### c) Thermomechanische Belastungen

Eine Simulation mit thermomechanischen Belastungen bei +150 °C führt zu Materialausdehnungen und damit zu Spannungen bis zu  $1,18 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup>. Die Spannungen sind damit zehnmal höher als bei den mechanischen Schockbelastungen bei 1000 G. Auffällig sind die hohen Spannungen auf der Innenseite des Lötrahmens im Übergang zum Substrat und den Spannungen auf dem Substrat neben dem Lötrahmen. Dies passt gut zu den beobachteten Passivierungsschäden in Abbildung 53, die eben an diesen Stellen erscheinen.

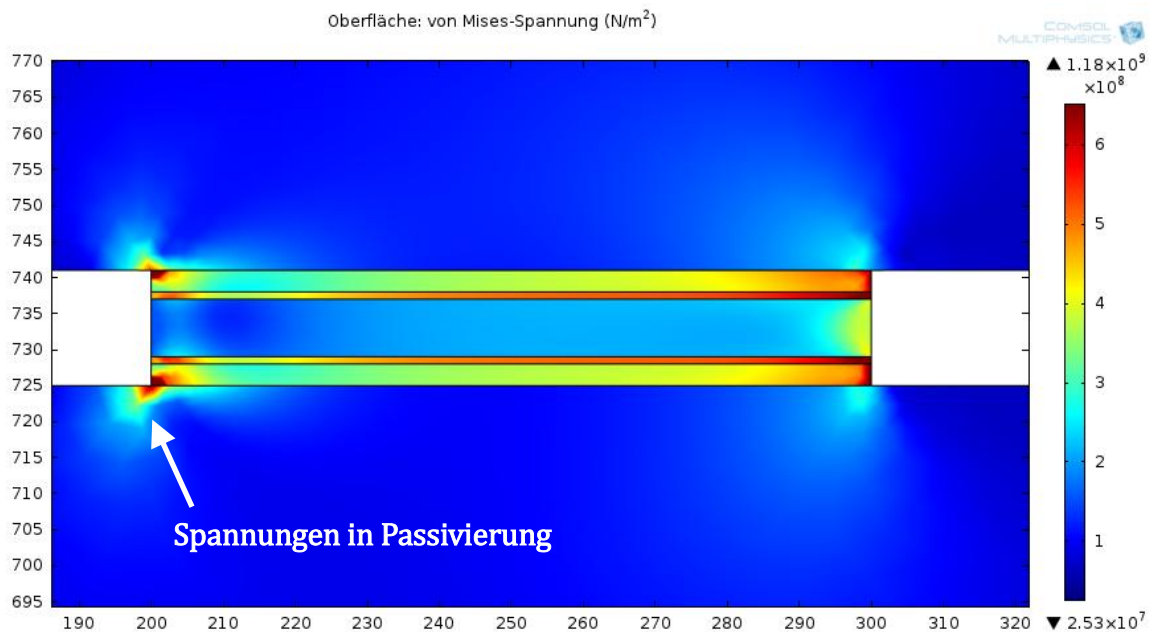


Abbildung 58: 2D Simulation der Von-Mises Spannung bei 150 °C Temperaturbelastung eines Lötrahmens

Die hier durchgeführten FEM Simulationen können zeigen, dass die beobachteten Schäden durch mechanische und thermomechanische Kräfte entstehen. Hierbei tauchen die höchsten Kräfte an der Grenzschicht zwischen Lötrahmen und Silizium auf der Außenseite des Lötrahmens auf. Ob diese Schäden dann auch tatsächlich zu einem Ausfall führen, hängt vom spezifischen Design ab. So zeigen die für diese Arbeit getesteten CSPs vom Fraunhofer IMS eine Robustheit gegen Umwelteinflüsse und keine Ausfälle. Jedoch sollten andere Packages und Designs auf diese Fehlermechanismen hin untersucht werden.

## 5.5 Mechanische Stabilität der Bolometer

Im Folgenden werden Methoden gezeigt, mit denen die Zuverlässigkeit der Bolometer untersucht werden kann. Da die Bolometerdesigns und mechanischen Eigenschaften je nach Hersteller sehr unterschiedlich sein können, werden hier möglichst allgemeingültige und anwendbare Methoden an Standardstrukturen gezeigt.

Die Stabilität der Bolometer kann experimentell durch die Zuverlässigkeitsprüfungen nachgewiesen werden. Gerade bei den Prüfungen der mechanischen Vibration und Schock sowie bei thermischen Wechselbelastungen sollte es zu keinen Pixelausfällen kommen. Bei keinen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zuverlässigkeitsprüfungen konnten Pixelausfälle detektiert werden. Die Bolometer vom Fraunhofer IMS zeigen somit eine hohe Robustheit gegen mechanische Kräfte. Um dies weiter zu bekräftigen, wurden FEM-Simulationen durchgeführt, mit denen Kräfte und Spannungen analysiert werden können.

Als Grundlage hierfür dienen Vereinfachungen von Bolometerdesigns, die in der Industrie und am Fraunhofer IMS oft verwendet werden. Die für die Simulation verwendeten exemplarischen Geometrien sind hierbei frei gewählt worden. Für Vergleichszwecke wurde ein zweiseitiges Bolometer mit einfachen Stegen (Abbildung 59), mit doppelten Stegen (Abbildung 60, rechts) und ein vierseitiges Bolometer (Abbildung 60, links) designt. Der Schichtaufbau wurde hier vereinfacht und besteht aus einer 200 nm dicken Siliziumoxidschicht und einer aufgesetzten 200 nm dicken Sensorschicht.

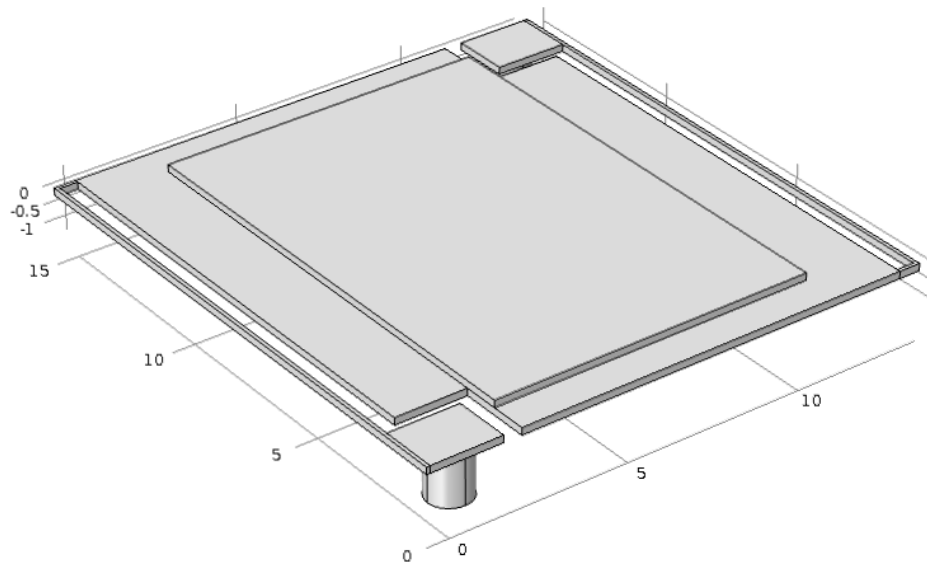


Abbildung 59: 3D-Sicht Bolometerdesign mit einfach zweiseitigen Stegen

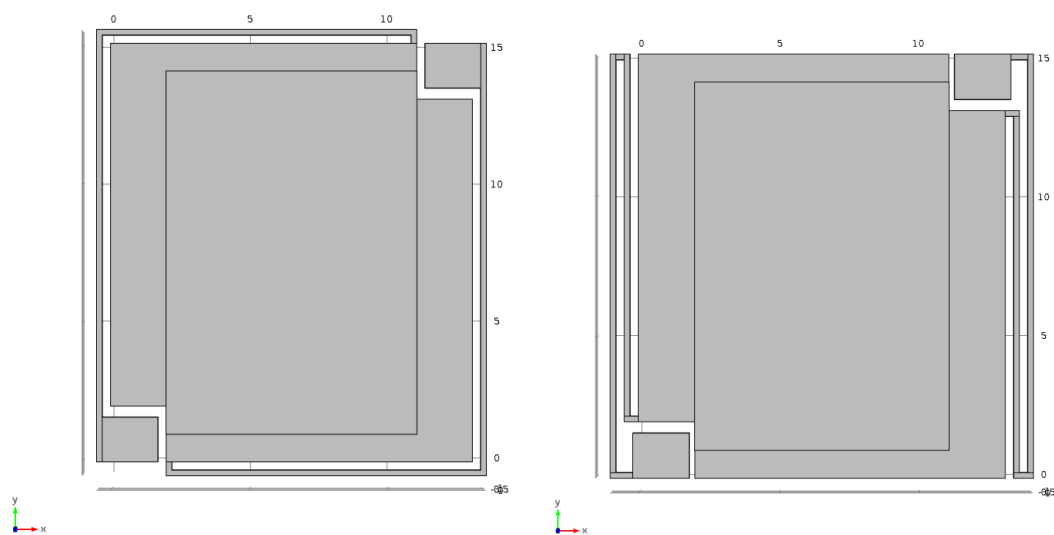


Abbildung 60: Draufsicht weiterer Simulationsmodelle von Bolometern mit vierseitigen Stegen (links) und doppelt-zweiseitigen Stegen (rechts)

Simuliert wurde zunächst eine mechanische Belastung in alle Raumrichtungen. Die auftretenden Materialspannungen werden durch die Von-Mises-Spannung beschrieben und sind in Abbildung 61 dargestellt. Die höchsten Materialspannungen entstehen dabei an den Wendepunkten der Stege.

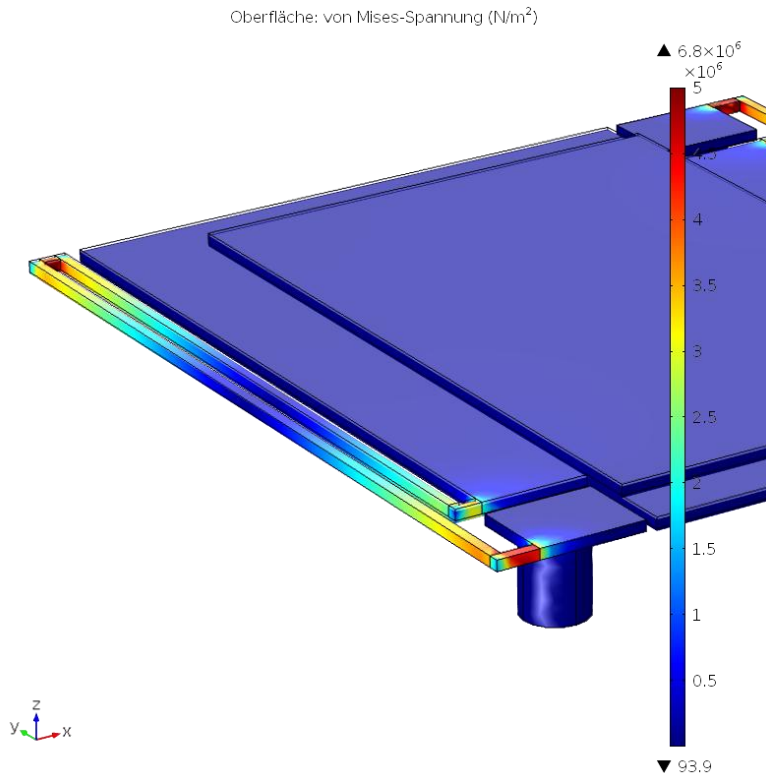


Abbildung 61: Abbildung eines Bolometer unter Beschleunigungskraft von 1000 G in z-Achse und Anzeige der Von-Mises-Spannung

Die entstehenden Materialspannungen und Verschiebungen (Tabelle 22) sind dabei aber gering. Eine Schädigung wird erwartet, wenn die Streckgrenze von Siliziumdioxid, die nach [4] bei 8,4 GPa liegt, überschritten wird. Die Spannungen sind aber selbst bei einer Beschleunigung von 1000 G weit davon entfernt. Dieser Vergleich zeigt, dass man Größenordnungen von einer möglichen Beschädigung durch reale Belastungen entfernt ist. Ergo sind mechanische Belastungen für die Bolometersensorelemente prinzipiell unkritisch, da diese eine stabile mechanische Struktur und eine sehr kleine Masse besitzen.

Allerdings geht die Simulation von einer ideal geformten Geometrie aus. Es kann in der Realität aber aufgrund von Prozessfehlern, wie fehlerhaften Lithografie- oder Ätzprozessen, zu geschwächten oder nicht ideal geformten Stegen kommen. Diese können beim Herstellungsprozess oder auch erst durch Umweltbelastungen in der Applikation zu Pixeldefekten führen. Daher müssen regelmäßige Zuverlässigkeitsprüfungen durchgeführt werden.

Tabelle 22: Verschiebungen  $d_m$  und Von-Mises Spannung  $\sigma_M$  bei Beschleunigungen in z-Achse eines zweiseitigen Bolometers

Beschleunigung /G	$d_m$ / $\mu\text{m}$	$\sigma_M$ / (N/m <sup>2</sup> )
1	1,75E-05	4,88E+03
20	3,50E-04	9,70E+04
50	8,76E-04	2,44E+05
200	3,50E-03	9,77E+05
500	8,76E-03	2,44E+06
1000	2,00E-01	4,88E+06

Ein Vergleich der Schockbelastungen in alle Achsen in Tabelle 23 zeigt, dass eine Beschleunigungskraft in Richtung der Stege kritischer und das vierseitige Bolometer empfindlicher ist. Ein besseres mechanisches Verhalten weist das doppelt-zweiseitige Bolometer auf, für den Fall, dass längere Stege gewünscht sind. Jedoch sind weder die Spannungen noch die Verformungen kritisch.

Tabelle 23: Vergleich der Von-Mises-Spannung  $\sigma_M$  und der Verschiebungen  $d_m$  für zweiseitige, vierseitige, doppelt-zweiseitige Bolometer bei einer Beschleunigung von 1000 G in alle drei Raumachsen

Bolometertyp		x	y	z
Einfach-zweiseitig	$d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	0,02	6,54E-04	0,02
	$\sigma_M$ (N/m <sup>2</sup> )	3,74E+06	3,21E+05	5,09E+06
vierseitig	$d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	0,04	0,03	0,07
	$\sigma_M$ (N/m <sup>2</sup> )	5,16E+06	4,85E+06	7,08E+06

Doppelt-zweiseitig	$d_m$ (mm)	0,04	1,96E-03	0,04
	$\sigma_M$ (N/m <sup>2</sup> )	4,22E+06	3,77E+05	6,80E+06

Neben der Höhe der möglichen einwirkenden Kraft, ist auch deren Frequenz wichtig. So kann bei Erreichen der Resonanzfrequenz die Verschiebung viel größer ausfallen und damit das Bolometer zerstören. Wenn, wie in Abbildung 62 gezeigt, die erste Eigenfrequenz erreicht wird kann es zu einer Auslenkung der Bolometermembran und zu einer Berührung der Stege kommen. Diese wären damit thermisch kurzgeschlossen und verlieren ihre Responsivität um Größenordnungen.

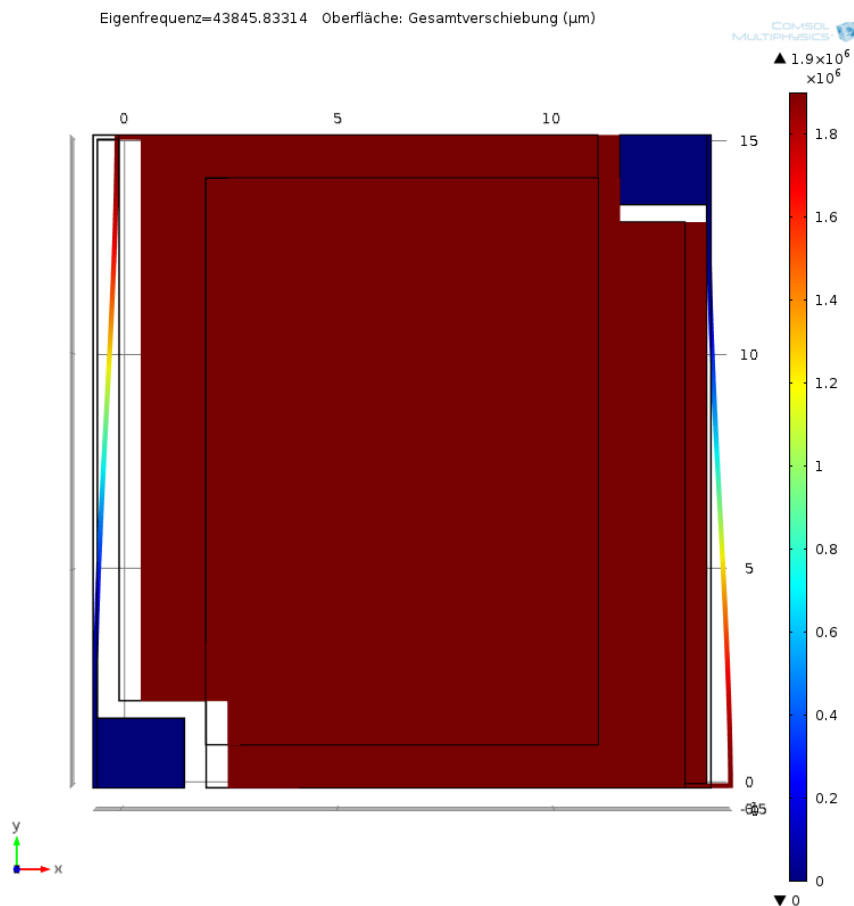


Abbildung 62: Verschiebung des zweiseitigen Bolometers im Resonanzfall mit farblich codierter Verschiebung



Ein Vergleich der niedrigsten und damit für die Applikation tendenziell gefährlichsten Eigenfrequenzen in folgender Tabelle zeigt, dass komplexere Stegdesigns und schmalere Stege zu niedrigeren Resonanzfrequenzen führen. Auch hier ist das vierseitige Bolometer im Vergleich zu dem doppelt-zweiseitigen anfälliger. Diese hohen Frequenzen um die 100 kHz sind jedoch meist nicht applikationsrelevant (siehe Tabelle 8). Es sollten aber für das spezifisch verwendete Bolometerdesign die potentiellen Resonanzfrequenzen und die auftretenden Frequenzen in der Applikation oder bei der Fertigung bestimmt werden.

Tabelle 24: Vergleich der niedrigsten vier Eigenfrequenzen bei verschiedenen Bolometerdesigns

Einfach-zweiseitiger Steg	Vierseitiger Steg	Doppelt-zweiseitiger Steg (200 nm)	Doppelt-zweiseitiger Steg (100 nm)
119 kHz	60 kHz	79 kHz	44 kHz
121 kHz	70 kHz	81 kHz	78 kHz
124 kHz	94 kHz	84 kHz	83 kHz
281 kHz	140 kHz	191 kHz	178 kHz

Eine weitere Möglichkeit ist, dass sich Bolometer bei thermischer Belastung oder thermischer Wechselbelastung verformen. Bei einer simulierten Temperatur von beispielsweise 130 °C zu einer Referenztemperatur von 0 °C ergeben sich aber nur geringe Verformungen von 30 nm an den Rändern des Bolometers. Zudem verbiegt sich das Bolometer nicht in seiner Achse, was zu einer Berührung der Stege führen könnte. Eine thermische Belastung der Bolometer wird damit auch als unkritisch angesehen. Bemerkenswert sind hierbei allerdings die hohen Spannungen von ca. 120 MPa, die auf die dünne metallische Leitbahn (mit simulierten 10 nm Dicke), die sich innerhalb des Siliziumdioxides befindet, wirken.

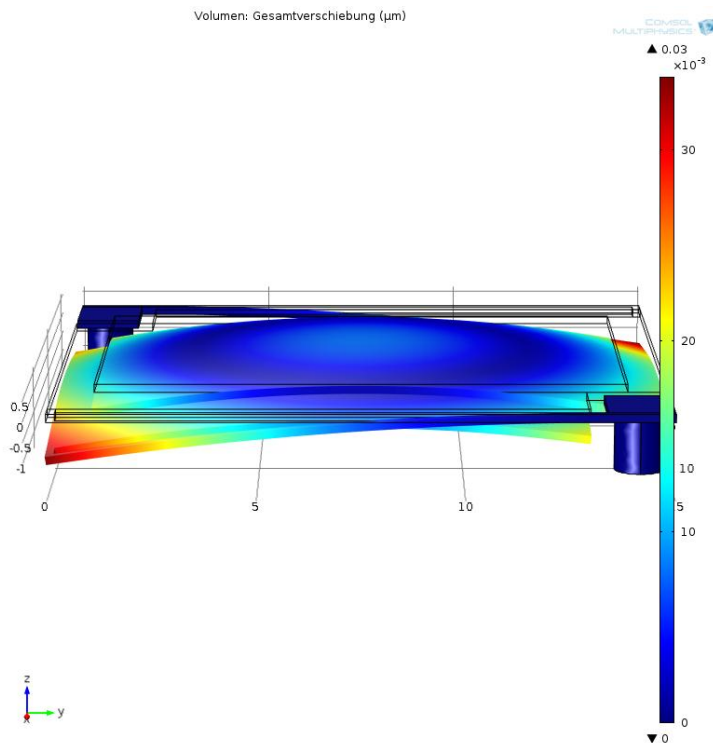


Abbildung 63: Verformung der Bolometer aufgrund von Thermospannungen von 130 °C

Wie hier gezeigt, sollten die herstellereinspezifischen Bolometerdesigns mit den hier vorgestellten FEM Simulationen auf Materialspannungen und Verformungen durch Umwelteinflüsse geprüft werden, um fehlerhafte Bolometerdesigns mit reduzierter Lebensdauer zu vermeiden. Dies sollte vor allem beachtet werden, wenn die Designs aus Performancegründen kleiner und dünner werden.

Zusammenfassend können sowohl experimentell wie auch theoretisch keine prinzipiellen Schwächen oder zuverlässigkeitsrelevanten Fehlermechanismen für die Bolometer ermittelt werden. Simulationen können aber keine Ausfälle, die aus schwankenden Fertigungsprozessen resultieren, entdecken. Daher müssen die Zuverlässigkeitsprüfungen mit mechanischem Schock, Vibrationen und thermischen Zyklen durchgeführt werden.

# 6 Entwicklung eines Zuverlässigkeitsprüfsystems

Auf Basis der in dieser Arbeit untersuchten zuverlässigkeitsrelevanten Fehlermechanismen können für Infrarotsensoren angepasste Prüfmethode entwickelt werden.

Die Fehlermechanismen (Kapitel 4) werden mit den Verfahren der beschleunigten Alterung (Kapitel 4.5) angeregt und ihre Auswirkung auf die Zuverlässigkeit untersucht (Kapitel 5).

Bei diesen Prüfungen wird, wie vor allem beim HTOL-Lebensdauertest, ein Überwachungssystem benötigt, mit dem die Prüflinge während der Alterung auf ihre Fehlermechanismen überprüft werden können. Die Entwicklung eines solchen Prüfsystems für Infrarotsensoren wird im Folgenden vorgestellt.

## 6.1 Prüfkriterien

Ein Prüfsystem für Zuverlässigkeitsprüfungen benötigt messbare Parameter, anhand derer Aussagen getroffen werden können, ob es zu einem Fehler gekommen ist oder ob sich kritische Qualitätseigenschaften, wie die Sensorperformance, verändert haben.

Bei Infrarotsensoren müssen die folgenden Fehler detektiert werden:

1. Veränderte Sensorperformance

Basierend auf den Untersuchungen aus Kapitel 4 und 0 ist die Degradation der Sensorperformance abhängig vom Innendruck, der über die Lebensdauer durch Ausgasprozesse steigt. Folglich muss bei einer Zuverlässigkeitsprüfung der Innendruck der Sensoren überwacht werden. Zudem kann ein Fehler und Verlust der Hermetizität des Package ebenfalls über den Innendruck erkannt werden.

## 2. Pixelausfälle

Defekte Bolometer / Pixel bilden einen störenden Bildeindruck und sind nicht akzeptabel, daher müssen die Bolometer in ihrer Performance und Funktion überprüft werden.

## 3. Elektrischer Defekt

Die elektrische Funktion des Sensors und damit des Schaltungsteils des ROIC muss vollständig überwacht werden. Dafür müssen die Sensoren entsprechend ihrer Spezifikation bei erhöhten Temperaturen angesteuert werden. Dies ist aber in Hinblick auf die hohe Anzahl an parallel zu testenden Sensoren und der hohen Zahl benötigter Pins pro Sensor, der benötigten Signalqualität und großen Leitungslängen nicht trivial und erfordert einen spezifischen Prüfaufbau. Für die Lebensdauertests wurde hierfür am Fraunhofer IMS ein eigener Messaufbau (Abbildung 64) entwickelt. Mit diesem können 120 Prüflinge nahezu zeitkontinuierlich angesteuert und deren prinzipielle elektrische Funktion geprüft werden. Der Prüfaufbau läuft in einem Ofen und realisiert die HTOL-Prüfung.

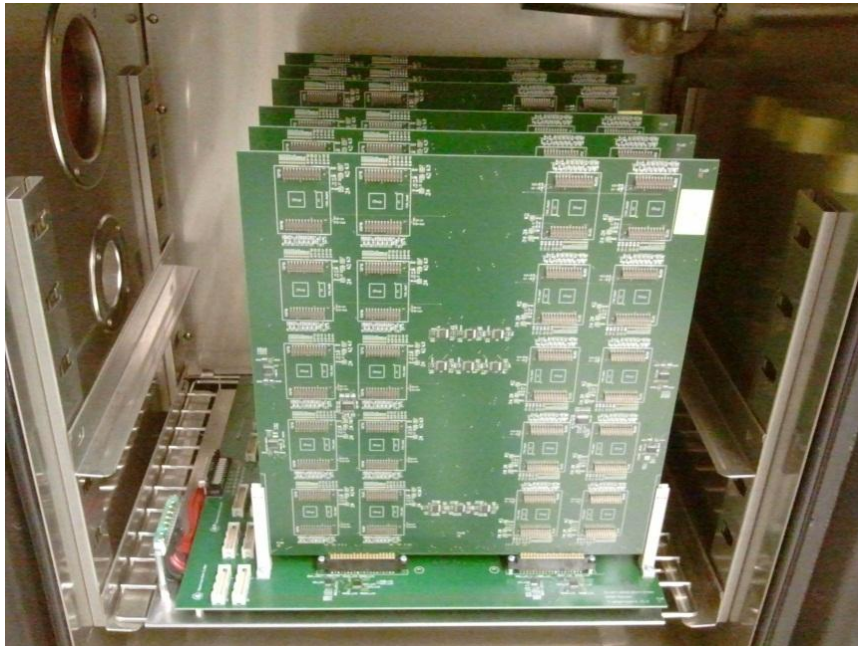


Abbildung 64: HTOL Zuverlässigkeitsprüfaufbau für Infrarotsensoren vom Fraunhofer IMS

Mit diesem System können Ausfälle des ROIC und teilweise Ausfälle der AVT, wie Drahtbondverbindungen oder zerstörende Chipbrüche, erkannt werden. Es können jedoch nicht alle Fehler, wie Performanceverluste, Ausfälle einzelner Bolometern oder des Package, erkannt werden. Daher wird dieses System mit einer Methode zur Messung des Vakuums erweitert, mit der somit alle relevanten Fehlermechanismen überwacht werden können.

Aktuell müssen die Zuverlässigkeitsprüfungen unterbrochen, die Prüflinge aus dem Prüfaufbau manuell entfernt und einzeln am Bauelementemessplatz nach [2] elektro-optisch charakterisiert werden. Dieses Verfahren dauert sehr lange und verursacht hohe Kosten, gerade wenn viele Prüflinge vermessen werden müssen. Die Anzahl der Messpunkte wird dabei gering gehalten, da der gesamte Testaufwand jedes Mal wiederholt werden muss. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein verbessertes Prüfverfahren entwickelt.

## 6.2 Grundlagen der Vakuummessung

Es gibt externe und interne Messmethoden zur Bestimmung des Package-Innendrucks. Die internen Messmethoden basieren dabei auf zusätzlichen Messstrukturen, die auf dem Substrat integriert werden.

Tabelle 25: Messverfahren zur Bestimmung des Package-Innendrucks

externe Messverfahren	interne Messverfahren
Helium-Lecktest	Pirani-Sensor
Messung der Deckeldurchbiegung	Resonanzstrukturen
FTIR Spektroskopie	
Gasanalyse RGA	

### externe Messverfahren

Klassischerweise werden Helium-Lecktests nach MIL oder JEDEC Standard zur Dichtigkeitsprüfung und Innendruckmessung von Packages angewandt. Diese sind aber für FIR-Packages, aufgrund des geringen Kavitätsumfanges nicht einsetzbar [126], [127]. Eine Möglichkeit ist die Analyse der im Package enthaltenen Gase per Restgasanalyse (RGA) [130], [129]. Allerdings wurde in Kapitel 5.1.4 gezeigt, dass diese zwar die im Package enthaltenen Gase bestimmen kann, aber eine Messung des Package-Innendrucks nicht möglich ist. Theoretisch wäre auch eine Messung der Deckeldurchbiegung [127] verursacht durch den Innendruck möglich. Diese lässt aber aufgrund der dicken Membran, Eigenstressungen und sehr geringen Durchbiegungen nur messtechnisch grobe Aussagen zu und kann eine Druckerhöhung im Zielbereich nicht messen. Ein neues und wenig erprobtes Verfahren ist die FTIR-Spektroskopie [127], die aber praktisch auf Grund der geringen Empfindlichkeit nicht sinnvoll einsetzbar ist.

Diese externen Verfahren sind jedoch nicht für automatische ZUV-Prüfsysteme geeignet, da sie wie die RGA meist teuer, ungenau, zerstörend, zeitaufwändig sind und keine Überwachungsfunktion ermöglichen. Daher soll die Innendruckmessung chipintern mit einem Vakuumsensor erfolgen.

### Interne Messungen

Zusätzliche Drucksensoren können auf dem Substrat des Infrarotsensors integriert werden [74], um das Vakuum zu bewerten. Eine Variante ist der Einsatz von Mikroresonatoren, die aber aufgrund ihres begrenzten Messbereichs nur für Nieder-Vakuum geeignet und damit nicht für Infrarotsensoren einsetzbar sind [130]. Stattdessen können Pirani-Sensoren eingesetzt werden, die einen theoretischen Messbereich bis  $10^{-4}$  mbar erreichen können und daher für Infrarotsensoren geeignet sind [130].

Der Nachteil dieser Messstrukturen ist, dass sie zusätzlich auf dem Substrat prozessiert und angesteuert werden müssen. Demzufolge ist ein kostenintensives Redesign des Infrarotsensors nötig und wertvolle Chipfläche geht verloren. Daher verfolgt diese Arbeit den Ansatz, die Bolometer direkt als Drucksensoren zu nutzen, um das Vakuum zu bewerten.

In Kapitel 4 wurde der Zusammenhang zwischen der Responsivität zu der thermischen Isolation und damit zum Innendruck beschrieben. Ein Anstieg des Innendrucks reduziert die Responsivität und kann daher, wie gezeigt, durch eine Überwachung der thermischen Leitfähigkeit bestimmt werden.

## **6.3 Messprinzip des Bolometer-Vakuumsensors**

Die Bolometer selbst können so angesteuert werden, dass mit ihnen der Innendruck des Packages bestimmt werden kann. Das Messprinzip wird im Folgenden beschrieben.

Die Bolometer werden über das ROIC mit einer Auslese-Spannung über eine spezifische Zeitdauer angesteuert und erwärmen sich dabei nach dem Jouleschen Gesetz (6.1). Dieses besagt, dass die von dem elektrischen Strom erzeugte Wärme  $Q_J$  proportional zur elektrischen Leistung  $P_{\text{Bolo}}$  und der Dauer  $\Delta t_{\text{Bolo}}$  ist.

$$Q_J = P_{\text{Bolo}} * \Delta t_{\text{Bolo}} \quad (6.1)$$

Die resultierende Temperaturerhöhung des Bolometers wird mit (6.2) nach [130] berechnet und ist abhängig von der thermischen Isolierung. Die Temperatur kann dabei über die Bolometerspannung und die Ansteuerzeit bestimmt werden.

$$\Delta T = \frac{P_{\text{elekt}}}{G_{\text{Th}}} = \frac{U_{\text{Bolo}}^2 \cdot t}{C_{\text{Th}} \cdot R_{\text{elekt}}} \quad (6.2)$$

Eine veränderte thermische Isolation bewirkt eine veränderte Temperaturerhöhung, welche über eine Änderung des elektrischen Widerstandes nach (6.3) gemessen werden kann. Die Messung erfolgt über den ROIC des Infrarotsensors durch die Auslese-/Ansteuerzyklen, der für die Infrarotmessung ebenfalls die Widerstandsänderung hochgenau ausgewertet. Der ROIC ist damit bereits optimal geeignet, um den Druck zu messen.

$$R_{\text{elekt}} = R_0 \cdot (1 + TCR \cdot \Delta T) \quad (6.3)$$

Die Messung des Widerstandes erfolgt dabei durch die Messung des Bolometerstrom nach (6.4). Der elektrische Strom hängt auch vom TCR ab, womit auch dessen Veränderung ermittelt und damit überwacht werden kann.

$$\Delta I_{\text{Bolo}} = \Delta G_{\text{Th}} / (TCR \cdot U_{\text{Bolo}}) \quad (6.4)$$

In der praktischen Anwendung können mehrere Auslesezyklen hintereinander gesetzt werden. So erhält man nach dem ersten Auslesen (Auslese 1) den Referenz-Widerstandswert ( $R_{\text{elekt}_1}$ ) und nach einem weiteren Auslesezyklus (bis  $t_2$ ) den Vergleichswert ( $R_{\text{elekt}_2}$ ). Dies ist in Abbildung 65 für zwei sequentielle Auslesezyklen schematisch dargestellt. Nimmt hierbei die thermische Isolierung durch einen gestiegenen Innendruck ab, wird auch der Temperaturanstieg des Bolometers und folglich die gemessene Widerstandsänderung kleiner.



Hierbei wurden zwei exemplarische Fälle eingezeichnet. Der rote Verlauf zeigt die Temperatur bei einem niedrigen Innendruck und damit einer niedrigen thermischen Leitfähigkeit, während der orangene Verlauf die Temperatur bei einem höheren Innendruck skizziert.

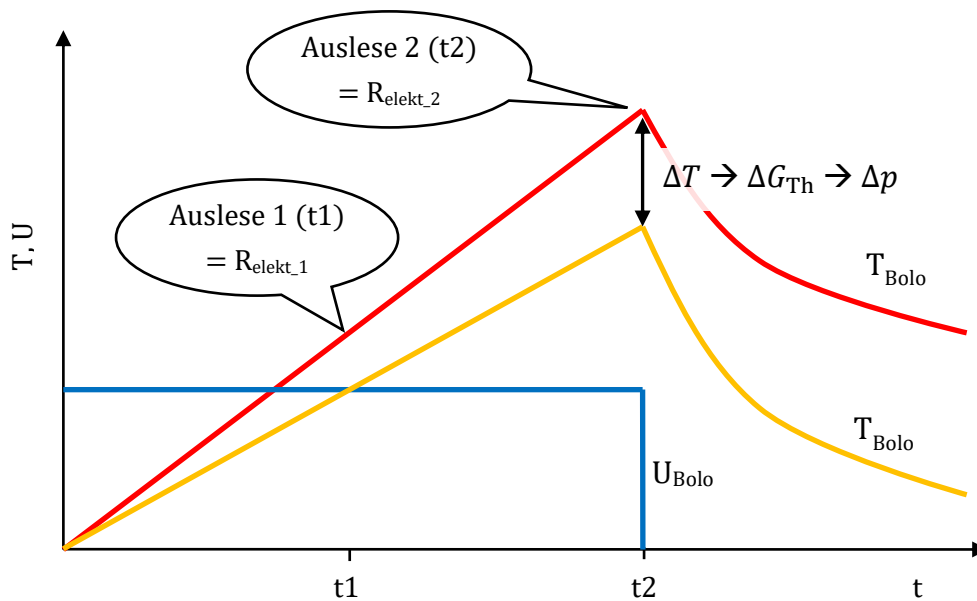


Abbildung 65: schematische Darstellung des Vakuummessprinzips für zwei aufeinander folgende Auslesezyklen Auslese 1 zum Zeitpunkt  $t_1$  und Auslese 2 bei  $t_2$ , in Blau: die angelegte elektrische Spannung am Bolometer, in Orange: der Temperaturverlauf  $T_{\text{Bolo}}$  bei erhöhtem Innendruck / thermischer Leitfähigkeit, in Rot: der Temperaturverlauf  $T_{\text{Bolo}}$  bei niedrigem Innendruck / thermischer Leitfähigkeit

Der Messwert des Vakuumsensors ( $VS$ ) wird aus dem Quotient des elektrischen Widerstandes zwischen dem ersten Referenz-Auslesewert ( $R_{\text{elekt}_1}$ ) und einer zweiten Messung ( $R_{\text{elekt}_2}$ ) nach einer weiteren Aufheizung berechnet.

$$VS = \frac{R_{\text{elekt}_2}}{R_{\text{elekt}_1}} \quad (6.5)$$

Im Falle der skizzierten Verläufe in Abbildung 65 würde  $VS$  einen höheren Wert bei einem niedrigeren (roter Verlauf) als bei einem höheren Innendruck (orangener Verlauf) aufweisen. Damit kann die Veränderung des Innendruckes durch

eine Änderung von  $VS$  gemessen werden. Der erfolgreiche Einsatz dieser Messung wurde bereits im Kapitel 5.1.4 in Abbildung 43 gezeigt. Hierbei konnte die Responsivitätsänderung mit Hilfe des  $VS$ -Wertes bestimmt werden.

Das Nutzen einer zusätzlichen Abkühlphase erzeugt eine größere Widerstandsänderung, falls die Spannung nicht weiter erhöht werden kann (Abbildung 66). Nach der Abkühlphase (2. Phase) muss das Bolometer wieder ausgelesen werden, um den Messwert zu erhalten und erwärmt sich dadurch zwangsweise erneut in der 3. Phase. In der Abkühlphase, in der das Bolometer nicht mehr elektrisch angesteuert wird, kühlt es in Abhängigkeit des Innendrucks ab, womit der Messwert nach der Abkühlphase eine größere Empfindlichkeit auf den Innendruck besitzt. Dies kann ausgenutzt werden, um die Empfindlichkeit der Messung zu beeinflussen oder, wie in Abbildung 71 gezeigt wird, um absolute Druckmessungen ohne Kalibrierung zu erreichen.

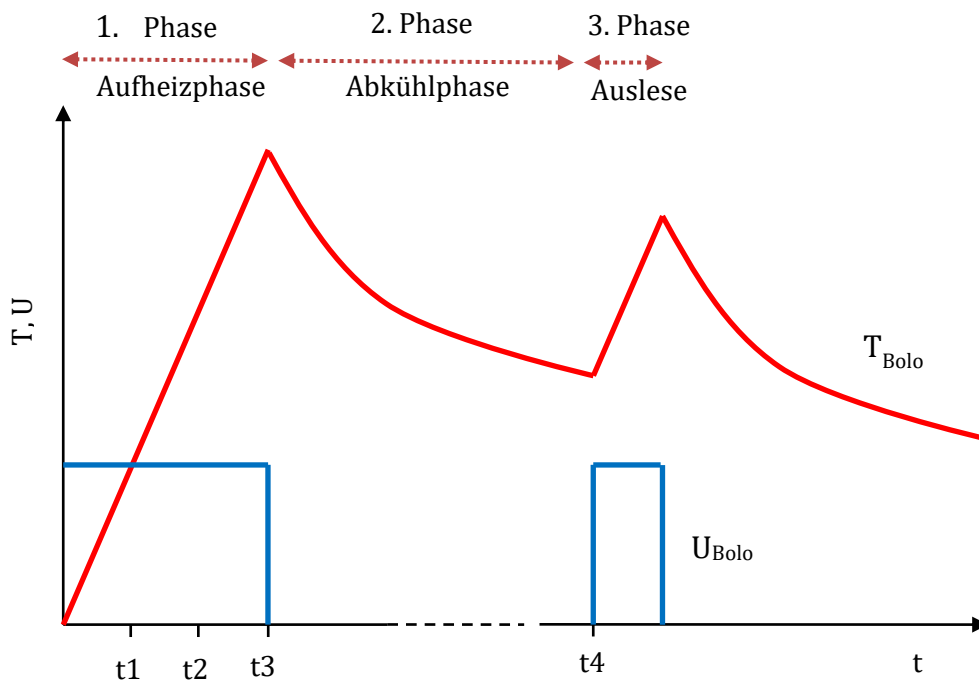


Abbildung 66: erweitertes Ansteuerschema mit zusätzlicher Abkühlphase, mit 3 sequentiellen Auslese- und damit Aufheizzyklen (bis  $t_3$ )

Der Vorteil dieses Messverfahrens ist, dass die Bolometer selbst genutzt werden, um die thermische Isolation zu messen. Wie in Kapitel 5.1.4 in Abbildung 43 gezeigt wurde, ist die Änderung des Innendrucks gleich der Responsivitätsänderung. Das bedeutet, wenn eine Veränderung der thermischen Isolation gemessen werden kann, ist auch die Responsivität reduziert. Im Umkehrschluss bedeutet dies ebenfalls, dass, wenn keine Veränderung gemessen werden kann, die Responsivität auch nicht mehr reduziert wird. In diesem Fall ist die thermische Leitfähigkeit der Gase im Verhältnis zu der der Strahlung und Festkörperleitung so gering, dass sie keinen messbaren Einfluss mehr besitzt. Dies ist möglich, da die Messstrukturen und damit die thermischen und geometrischen Parameter beider Messungen gleich sind.

## 6.4 Experimentelle und simulative Ergebnisse

Zur Verifizierung und Validierung der Vakuummessmethode wurden zunächst auf Grundlage der thermischen Modelle aus Kapitel 4.3.2 Finite-Elemente-Methode Simulationen (FEM) durchgeführt und anschließend das Messprinzip experimentell untersucht.

### a) FEM Simulation

Eine Simulation bietet sich an, da das 3D Bolometerdesign und alle thermischen Verlusteffekte, wie sie im Kapitel 4 beschrieben sind, zeitgleich und zeitlich aufgelöst berechnet werden können.

Die Simulationen wurden anhand eines 3D Bolometermodells mit den spezifischen Design- und Materialparametern der Bolometer vom Fraunhofer IMS und einem Pixelpitch von 17  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Genutzt wurde dabei das Programm COMSOL Multiphysics, bei dem die Toolboxen für die joulesche Erwärmung mit elektrischer Stimulation, die Feststoff-Wärmeleitung, die thermische Strahlung und der Wärmeverlust über Gaskonduktion implementiert wurden (Gleichungen siehe Kapitel 4.3.2). Die Simulation der Widerstandsänderung, gemäß Glei-

chung (6.5) wurde für verschiedene Druckwerte durchgeführt und in Abbildung 67 in dem blauen Graph normiert dargestellt. Der Sensor zeigt einen möglichen Messbereich bis ca.  $10^{-2}$  mbar.

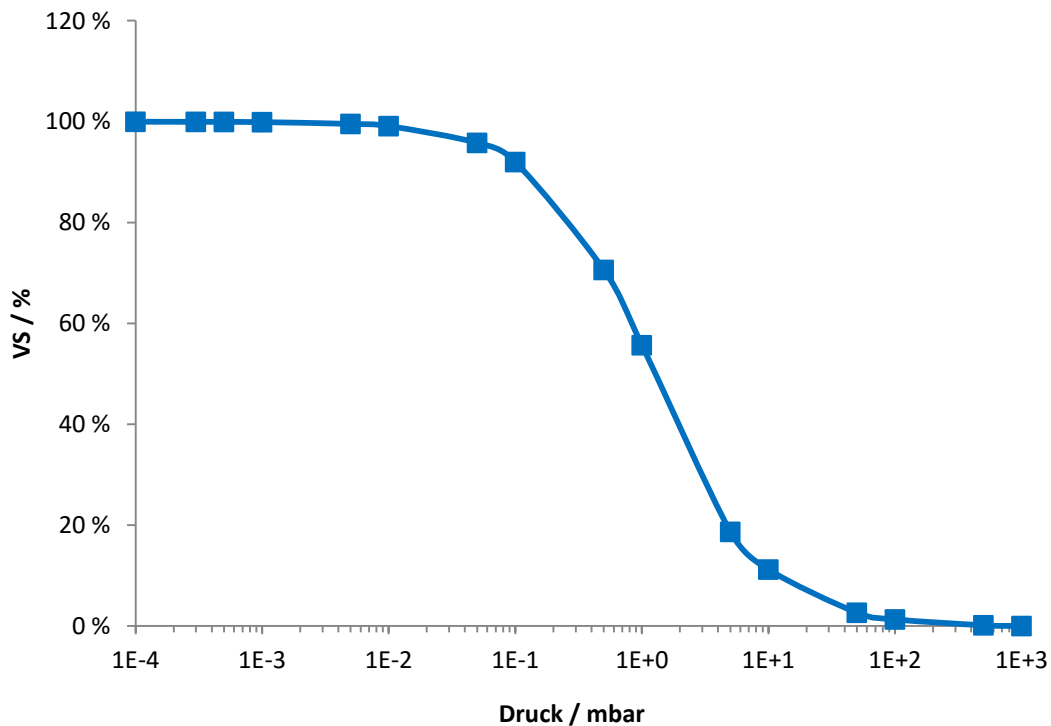


Abbildung 67: FEM Simulationsergebnisse der Widerstandsänderung VS

### b) Experimentelle Ergebnisse: analoge Messung

Teststrukturen mit direkt kontaktierbaren Einzelbolometern wurden mit dem in Abbildung 68 skizzierten Prüfaufbau vermessen, um das Messprinzip praktisch nachzuweisen. Die Bolometer werden in einer Vakuumkammer mit angeschlossener Vakuumpumpe betrieben. Dabei kann durch die Druckregler ein spezifischer Druckwert eingestellt und somit der Messbereich durchfahren werden. Als Referenzsensoren zur Bestimmung des Kammerdrucks wurden ein Pirani-Drucksensor und eine Kaltkathodenmessröhre eingesetzt. Da sich der Infrarotsensor im Vakuum schnell aufheizt und daraus Messabweichungen resultieren, sollte ein Temperaturcontroller (TEC) eingesetzt werden. Ein Funkti-

ongenerator im Pulsbetrieb stellt die Auslesezyklen des ROIC nach. Somit werden hier Spannung und Pulsdauer wie im realen Betrieb ausgewählt. Damit die Bolometer auch elektrisch angesteuert werden können, werden die Signale über hochvakuumdichte Durchkontaktierungen mit dem Messverstärker verbunden. Dieser verstärkt den Bolometerstrom und stellt ihn am Oszilloskop dar. An diesem kann dann die zeitliche Veränderung des Bolometerstromes und damit des temperaturabhängigen Widerstandes gemessen werden.

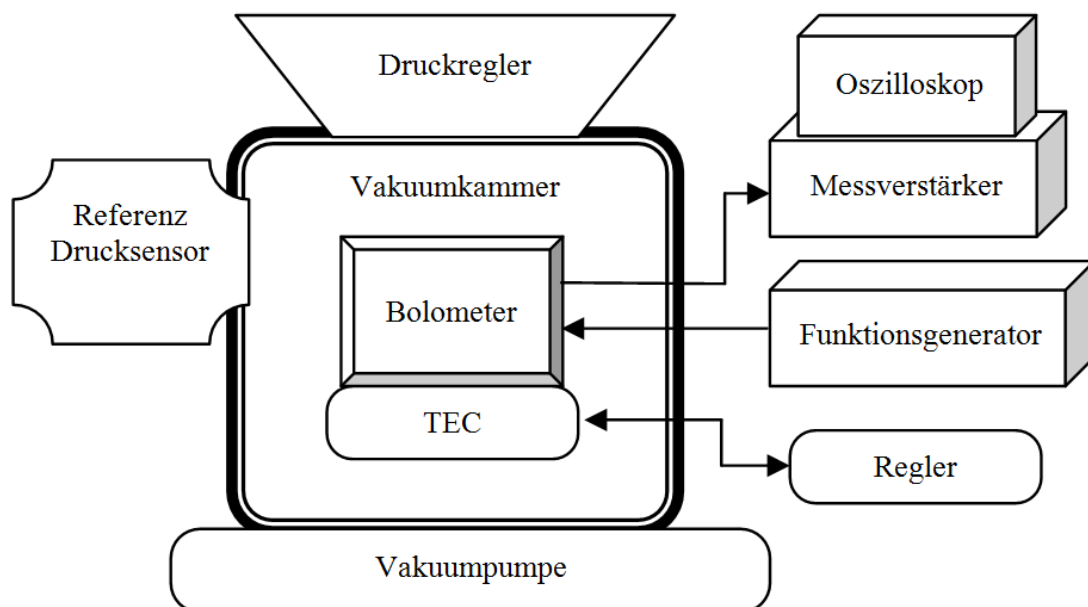


Abbildung 68: schematischer Messaufbau zur analogen Druckmessung an Einzelbolometern

Die gewonnen Messwerte sind normiert in Abbildung 69 dargestellt. Vergleichbar zu den Simulationen konnten Drücke bis  $10^{-2}$  mbar gemessen werden.

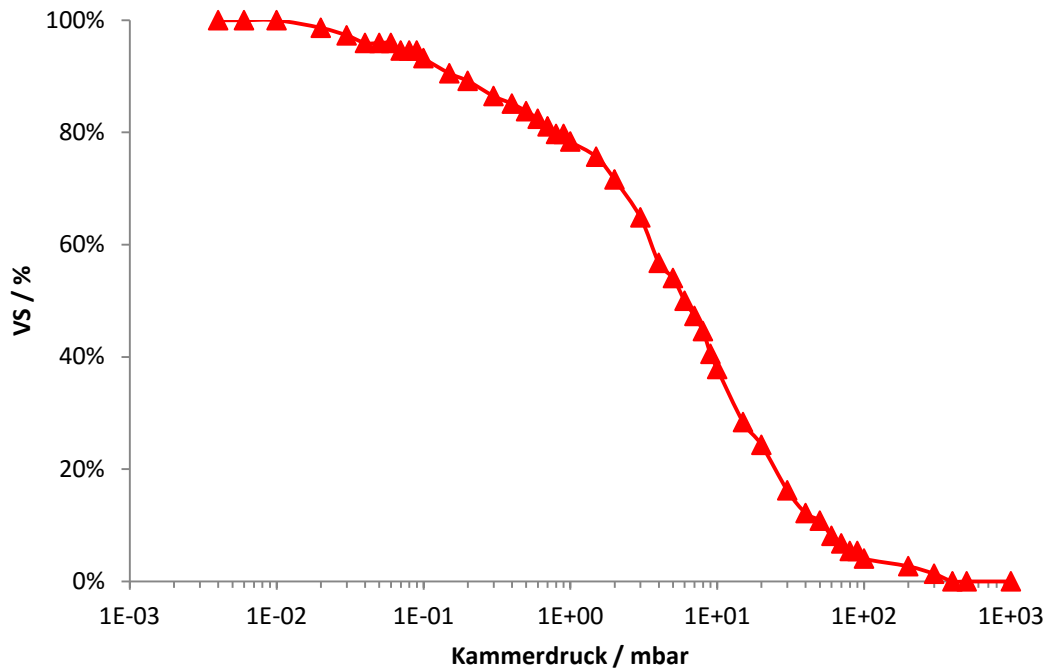


Abbildung 69: Messkurve der analogen Druckmessung eines Einzelbolometers normiert dargestellt

### c) Experimentelle Ergebnisse: digitale Messung am IRFPA

Die Messungen mit dem Infrarotsensor wurden mit dem gleichen Messaufbau wie in Abbildung 68 durchgeführt nur, dass in diesem Fall der Sensor komplett angesteuert, ausgelesen und am PC ausgewertet wird.

Es wurden zwei Messwerte in der Heizphase und ein Wert nach einer zusätzlichen Abkühlphase (siehe Abbildung 66) aufgezeichnet. Bei den Messungen in der Heizphase zeigt sich eine Empfindlichkeit über den gesamten Druckbereich, während die Messungen nach einer zusätzlichen Abkühlphase eine höhere Empfindlichkeit im Druckbereich von 1 bis  $10^{-2}$  mbar aufweisen. Bei höheren Drücken ist das Bolometer in der Abkühlphase vollständig abgekühlt, womit keine höheren Drücke gemessen werden können. Mit allen drei Messwerten können Druckwerte bis  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar gemessen werden, darunter verschwinden die Änderungen im Rauschen.

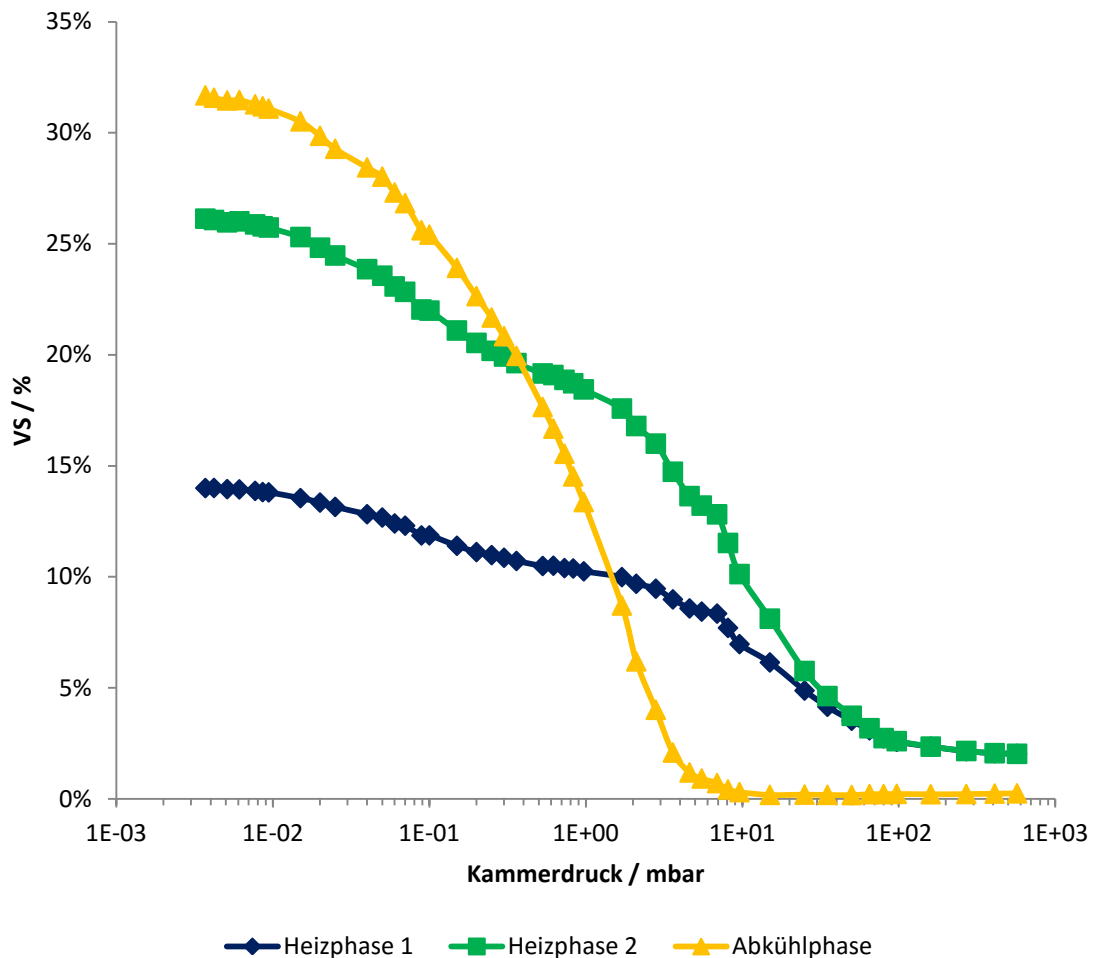


Abbildung 70: digital ausgelesene Messwerte des Vakuumsensors: schwarz und grün sind Messung bei der Aufheizphase, gelb beinhaltet eine zusätzliche Abkühlphase

Ein weiterer Nutzen der Abkühlphase ist es, statt der bisher relativ gemessenen Änderung des Innendrucks, eine Absolutwertmessung durchzuführen. Dazu wird der Quotient aus den vorhandenen Messwerten nach der Abkühlphase und der Heizphase gebildet (siehe Abbildung 71). Das Prinzip hierbei ist, dass bei einem niedrigen Druck in der Abkühlphase das Bolometer nur geringfügig abkühlt und somit der Messwert  $VS$  hoch ist. Umso höher der Druck ist, desto niedriger ist entsprechend das Verhältnis aus Abkühlphase und Heizphase. Der Messbereich dieser Messung kann über die Länge der Abkühlphase eingestellt werden und wurde hier so gewählt, dass der für Bolometer relevante Druckbe-

reich bis ca. 10 mbar abgedeckt wird. Mit dieser Erweiterung des Basis-Messprinzips kann, wie in Abbildung 71 gezeigt wird, der Innendruck absolut bestimmt werden, während  $V/S$  nur relative Änderung und Degradationen über die Zeit bestimmen kann.

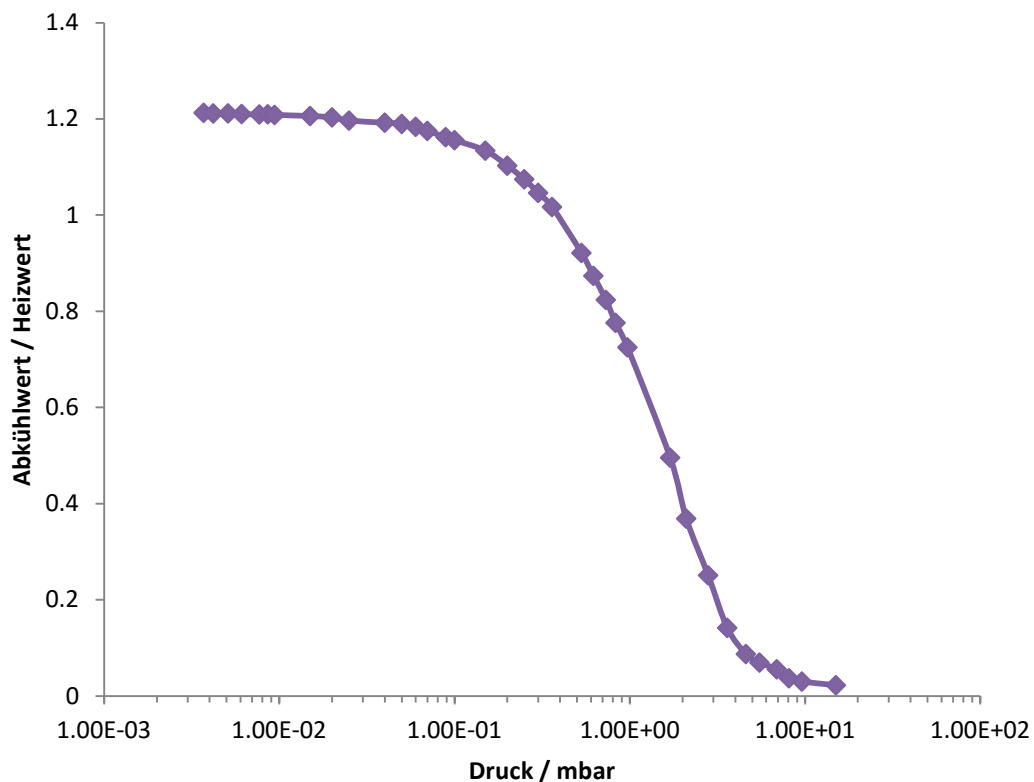


Abbildung 71: Verhältnis aus dem Abkühlwert zum Heizwert zur Absolutwertmessung

Ein Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigt in Abbildung 72, dass die Simulation sehr nahe an den analogen Messungen liegt, was beweist, dass die zu Grunde liegenden thermischen Modelle anwendbar und hinreichend genau sind. Die digitale Messung am Infrarotsensor zeigt einen etwas höheren Messbereich bis zu  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar, da diese Messung eine deutlich bessere Auflösung besitzt als die analoge Messung. Damit ist der Messbereich groß genug und kann die Anforderung von  $10^{-2}$  mbar erfüllen. Zusätzlich zur Druckmessung kann mit diesem Verfahren ebenfalls eine Veränderung des TCR detektiert werden. Diese ist nach Kapitel 5.1.3 jedoch klein gegenüber den Auswirkungen des



Innendruck und es kann nicht unterschieden werden, ob die Änderung vom TCR oder vom Druck resultiert. Ein Vergleich der Messwerte des Vakuumsensors mit denen des Bauelementetesters zeigt in Abbildung 43, dass der Vakuumsensor deutlich geringere Messabweichungen aufweist.

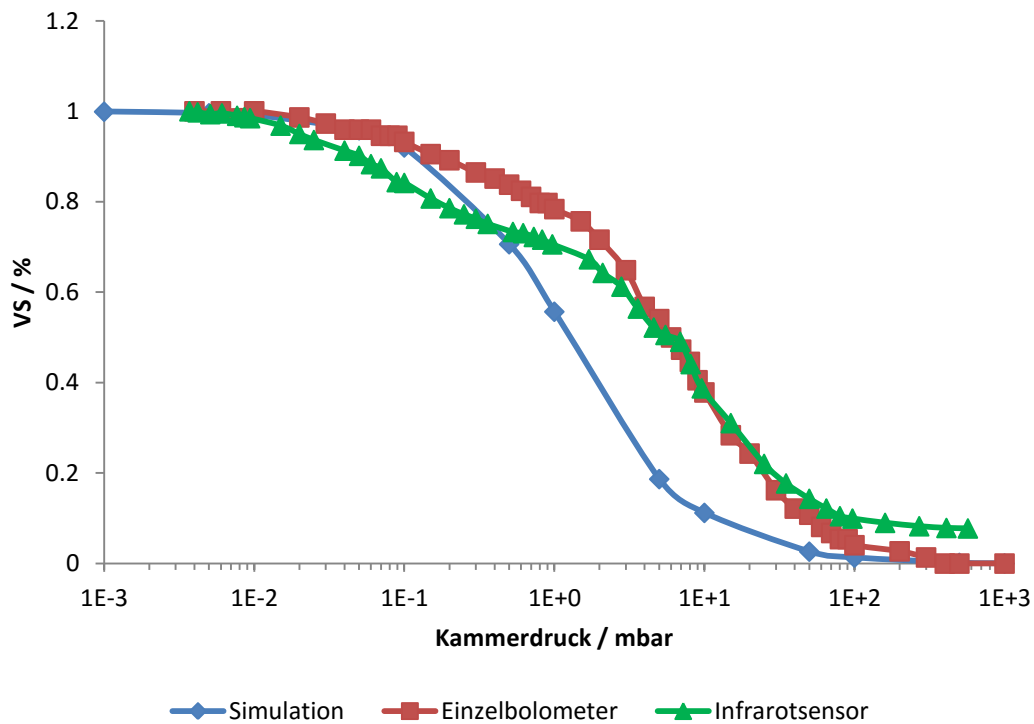


Abbildung 72: Vergleich der FEM Simulationsergebnisse (blau), der analogen Messung an Einzelbolometern (rot) und an Infrarotsensoren (grün)

Der Messbereich der Vakuummessung mit Bolometern befindet sich im selben Bereich wie in [131] und [74], die speziell designte Vakuumsensoren einsetzen und besitzt damit eine vergleichbare Leistungsfähigkeit.

## 6.5 Überwachung der Bolometerpixel

Prinzipiell können je nach Design des ROIC einzelne Bolometer zur Vermessung genutzt werden. Je mehr Bolometer genutzt werden, desto mehr Messpunkte stehen für eine Nachbearbeitung, wie eine Mittelwertbildung, zur Verfügung und reduzieren Messabweichungen. Das Verfahren kann aber auch erweitert werden, indem es auf jedes Bolometerpixel angewendet wird. Damit können nicht nur der Innendruck des Package, sondern auch die thermische Leitfähigkeit und der TCR jedes Bolometers vermessen werden. Es können somit defekte und stark degradierte Pixel erkannt und per Software gefiltert werden. Dies ist für den praktischen Einsatz sehr interessant, da die Bolometer mit einem einfachen und schnellen Selbsttest ohne zusätzliche Peripherie charakterisiert werden können. Für eine möglichst schnelle Auswertung müssen so viele Bolometer wie möglich gleichzeitig angesteuert und die hohe Bildwiederholungsrate der IRFPAs von meist 30 Bildern pro Sekunde eingesetzt werden, um möglichst viele Messpunkte zu gewinnen und die Testzeit minimieren zu können.

Mit dieser Lösung können die über die Lebensdauer entstehenden Defektpixel, die einen sehr störenden Bildeindruck erzeugen, detektiert und gefiltert werden. In Abbildung 73 wurden beispielhaft alle Pixel mit dem Vakuumsensor vermessen und defekte Pixel mit einer Responsivität von 0 detektiert.

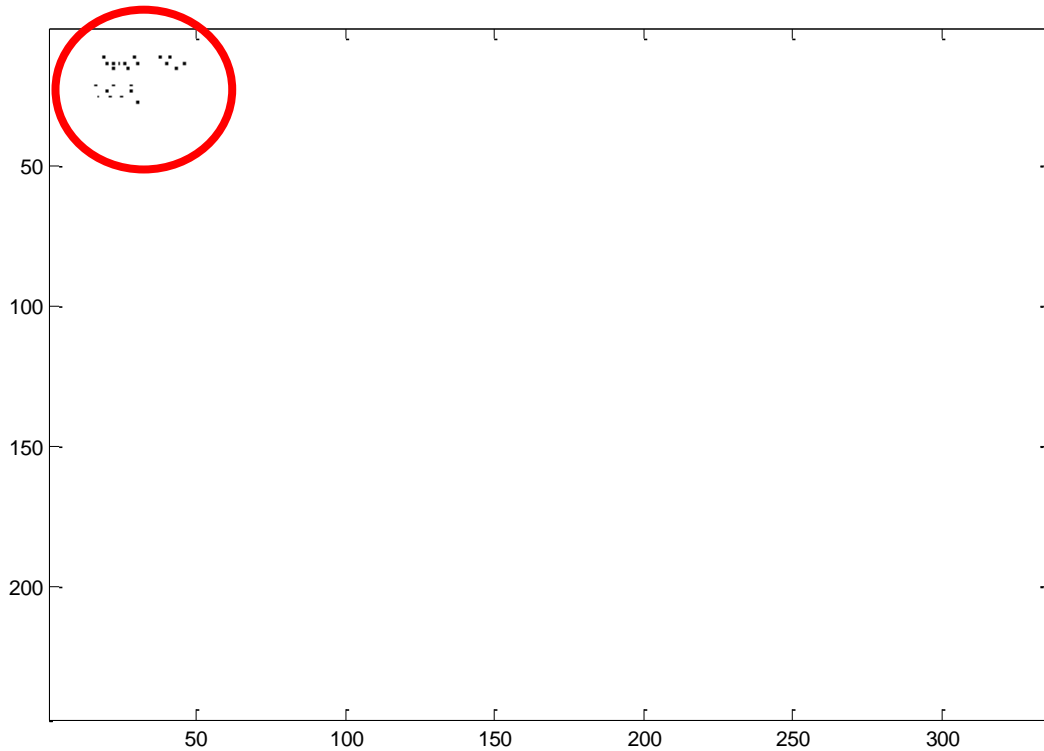


Abbildung 73: Detektion von defekten Pixeln (schwarze Punkte) in einem QVGA-IRFPA mit dem Vakuumsensor

Die Messergebnisse dieses Verfahrens sind in Abbildung 74 grafisch dargestellt. Die globale Degradation wird aus dem Mittelwert aller Bolometer gewonnen und wird bei der zweiten Messung abgezogen, um die Veränderung einzelner Pixeldefekte zu analysieren.



Abbildung 74: Beispiel eines QVGA Bildes mit den farbcodierten Vakuumsensormesswerten für jedes Pixel zwischen zwei Messzeitpunkten, bei dem die globale Drift herausgerechnet wurde (Index = 0)

Eine Vergrößerung des Defektbereiches (Abbildung 75) im oberen linken Bereich in Abbildung 74 zeigt veränderte Bolometerpixel, mit höheren (rote) und niedrigeren (blaue) Werten.

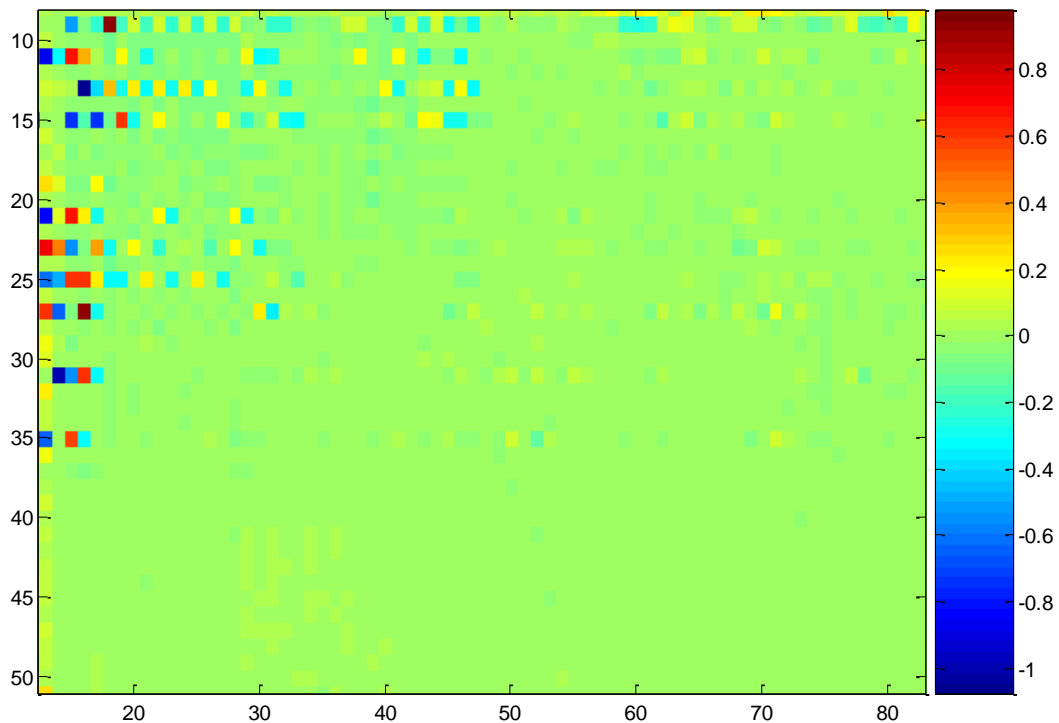


Abbildung 75: Fokus auf den Defektbereich in Abbildung 74

Somit konnten mit diesem Verfahren in einem schnellen Selbsttest defekte und degradierte Pixel erfolgreich erkannt werden. Defekte Pixel können herausgefiltert und Pixel mit veränderter Responsivität per Software abgeglichen werden.

## 6.6 Praktische Implementierung

Da bewiesen wurde, dass eine Reduzierung der Performance mit dem Vakuumsensor gemessen werden kann, sind verschiedene Einsatzszenarien denkbar. Zum einen kann dieses Messverfahren für einen Messplatz verwendet werden, bei dem die Sensoren schnell kontaktiert und vermessen werden können.

### Zuverlässigkeitsprüfaufbau

Es kann aber auch direkt in einem Zuverlässigkeitsprüfaufbau eingesetzt werden. So kann die HTOL-Prüfung zum Nachweis der Lebensdauer, mit dieser Methode erweitert werden. Damit müssen die Sensoren nicht extern, sondern können direkt im Ofen, während des Betriebs automatisch vermessen werden. Der Vorteil ist, dass eine Unterbrechung der Prüfung, ein manuelles Handling und externes Messen unnötig sind und somit Kosten und Zeit eingespart werden. Weiterhin lässt sich somit nicht nur die elektrische Funktionalität der Sensoren, sondern auch deren Performance, global und für jedes Pixel, sowie Pixelausfälle, Package-Fehler und Undichtigkeiten automatisch überwachen. Damit können alle zuverlässigkeitsrelevanten Fehlermechanismen für Infrarotsensoren detektiert und überwacht werden. Die Vorteile dieser Lösung sind in Tabelle 26 mit dem aktuellen Stand der Technik verglichen.

Tabelle 26 Stand der Technik und optimierter Prüfaufbau durch Vakuumsensor bei Zuverlässigkeitsprüfungen

Stand der Technik	Optimierte Methodik
Unterbrechung ZUV-Prüfung	Keine Unterbrechung
Messung extern am BE-Testsystem	Messung durch ZUV-Prüfaufbau
Manuelle Messung einzelner BEs	Messung aller BEs nahezu zeitgleich
Lange BE-Testzeit	Entfällt
Nötiges Personal zum Bestücken	Entfällt
Personalkosten hoch	Gering
Diskrete Messpunkte	Nahezu kontinuierliche Messung
Hoher Zeitaufwand	Minimale Durchlaufzeit

### Einsatz in der IR-Kamera

Eine weitere praktische Anwendung ist der Einsatz in der (mobilen) Infrarotkamera (Beispiel Abbildung 76). Auch hier kann der Vakuumsensor eingesetzt werden, um alle beschriebenen Fehlermechanismen zu überwachen. Es ergeben sich aber noch weitere sehr nützliche Vorteile. So kann die Kamera bei ei-

nem defekten Package oder zu weit gesunkener Performance den Nutzer automatisch auf eine Wartung hinweisen. Die Kamera könnte sich aber auch selbst kalibrieren, da sie die Performancedegradation messen und entsprechend die Bildwerte anpassen kann. Es können auch Lebensdauerinformationen über den Produkteinsatz gespeichert werden, um somit Nutzerinformationen zu sammeln oder eine Ende der Lebensdauer zu prognostizieren. Zudem können defekte oder stark degradierte Pixel, die einen sehr störenden Bildeindruck schaffen, detektiert und per Software herausgefiltert werden. Somit kann die Qualität der infraroten Bildsensorik deutlich verbessert werden.



Abbildung 76: Ferninfrarotkamera vom Fraunhofer IMS

### Einfluss auf die Vakuummessung

Das Vakuummessverfahren wurde auf mögliche Einflussfaktoren für Messfehler analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Messungen des Vakuumsensors temperaturabhängig sind und daher Fehler entstehen, wenn die Temperatur nicht stabil ist. Während die Temperatur im Ofen bei der künstlichen Alterung konstant ist, wird sie bei einem Einsatz in einer mobilen Kamera stark schwanken. Daher wird eine zusätzliche Temperaturkompensation benötigt, um den Messfehler

klein zu halten. Hierfür wurde eine Methode zur Temperaturkompensation entwickelt.

Das Problem ist, dass sich bei einer veränderten Umgebungstemperatur der elektrische Bolometerwiderstand und damit die Heizleistung verändern.

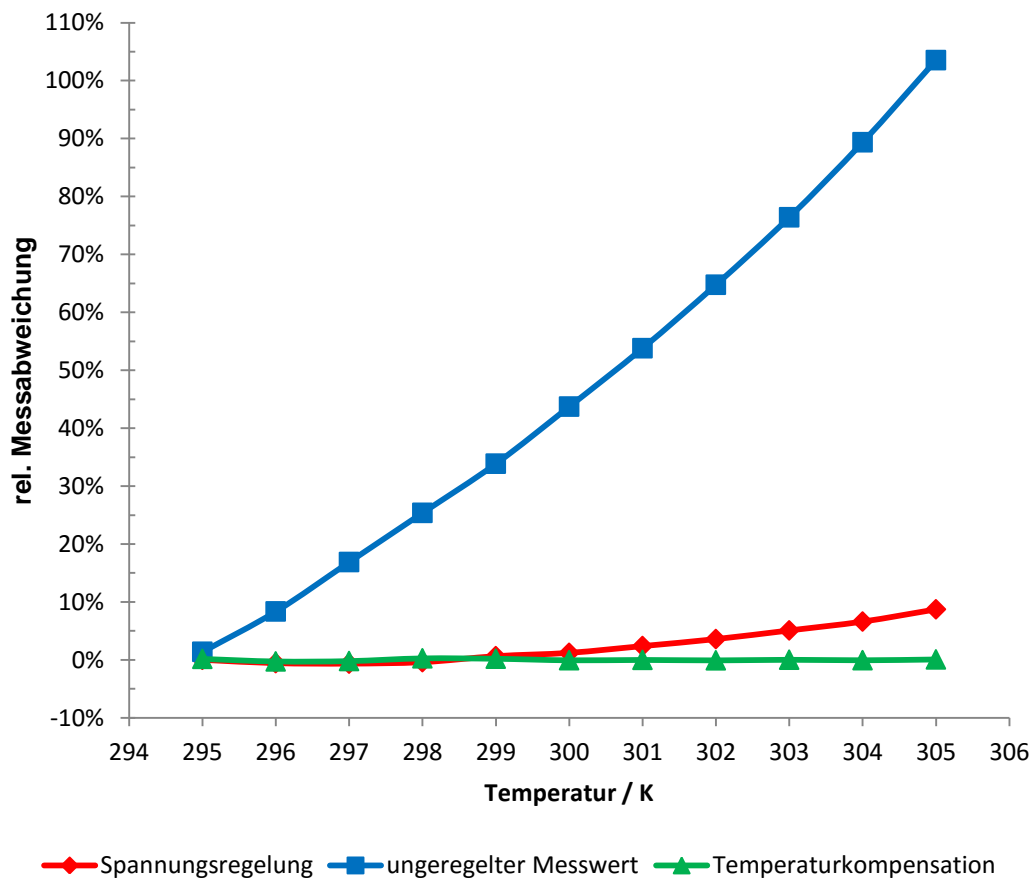


Abbildung 77: Vergleich der Messabweichungen des Vakuumsensors, der Rohwerte (blau), mit Spannungsregelung (rot) und mit Temperaturkompensation über den Temperatursensor (grün)

Abbildung 77 zeigt, dass der Messfehler ohne Temperaturregelung mit ca. 10 % pro Grad Kelvin sehr groß wird. Folglich müssen Gegenmaßnahmen getroffen werden. Eine Variante ist die Korrektur der Bolometerspannung. Wird z. B. eine Erhöhung des elektrischen Widerstandes und damit eine niedrigere Temperatur gemessen, kann entsprechend dem Ohmschen Gesetz die Spannung um die-



sen Anteil reduziert werden, um die Heizleistung gleich zu halten. Dies funktioniert nur für kleine Temperaturschwankungen bis 4 °C gut. Bei größeren Schwankungen wird, wie durch die rote Kurve in Abbildung 77 dargestellt, der Messfehler zu groß und erreicht ca. 10 % bei 10 °C Temperaturschwankung. Der Vorteil dieser Lösung ist, dass sie für die meisten IRFPAs anwendbar sein sollte, jedoch ist der Restfehler zu groß. Eine bessere Lösung ist eine Temperaturkompensation über einen digitalen Temperatursensor, welcher sich auf dem Substrat im ROIC befindet. Mit ihm kann die Temperatur gemessen und der Messfehler herausgerechnet werden. Die Messung mit dieser Temperaturkompensation ist in Abbildung 77 in der grünen Kurve dargestellt und zeigt keinen Temperatureinfluss mehr.

Zudem zeigen die Messungen mit dieser Temperaturkompensation eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit. Bei über 100 Messungen wurde eine Standardabweichung von unter 0,2 % berechnet. Damit ist dieses Verfahren geeignet, um Degradationen genau zu bestimmen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Zuverlässigkeit und der Fehlermechanismen von ungekühlten Mikrobolometer-Infrarotsensoren sowie der Entwicklung darauf basierender innovativer Prüfmethoden.

### Methoden

Die methodischen Untersuchungen wurden anhand der vom Fraunhofer IMS entwickelten QVGA Infrarotsensoren mit eigenem Bolometerdesign und Chip-Scale-Package durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf andere Technologien oder Designs, wie MEMS mit hermetischen Package, übertragen. Im ersten Teil dieser Arbeit, wurden die Infrarotsensoren in theoretischen Voruntersuchungen in ihre strukturellen Bestandteile untergliedert und hinsichtlich der Zuverlässigkeit und potentiellen Fehlermechanismen untersucht. Auf dieser Grundlage wurden Zuverlässigkeitsprüfungen zur beschleunigten Alterung konzipiert und durchgeführt. Damit konnten die real wirkenden Fehlermechanismen analysiert und darauf aufbauend ein Zuverlässigkeitsprüfsystem entwickelt werden. In dieser Arbeit wurden damit erstmalig umfassende und wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Infrarotsensoren durchgeführt.

### Lebensdauer

Es kam trotz der eingesetzten hohen Belastungen und damit intensiven Alterung zu keinen Ausfällen des Chips, der Elektronik, der Bolometer, der AVT oder des Packages. Die Infrarotsensoren zeigten somit theoretisch und praktisch keine design- oder materialbedingten Schwächen und können sehr hohe potentielle Lebensdauern erreichen.

### Package

Das kompakte und kostengünstig herstellbare Chip-Scale-Package zeichnet sich durch eine große Lebensdauer und Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse

se aus. Dabei war es höheren Belastungen, als bei den Prüfungen eines anderen Herstellers mit konventionellen Keramik-Package [25] ausgesetzt. Trotzdem zeigten sich neben einer Schwächung der Festigkeit durch die Ausbildungen von Poren im Lötrahmen und einer geringen Rissbildung keine Limitierung der Lebensdauer oder der möglichen Anwendungsgebiete des hermetischen Packages.

### Bolometer

Durchgeführte Prüfungen mit mechanischer und thermomechanischer Belastung zeigten keine Schäden an den Bolometern. Die hohe mechanische Stabilität wurde zusätzlich durch Simulationen untermauert. Diese zeigen, dass die auftretenden Spannungen und Verformungen des hier untersuchten Designs unkritisch sind und dass die Zuverlässigkeit der Bolometer bereits in der Designphase über Simulationen geprüft werden kann. Die Strombelastung der elektrischen Leitbahnen durch die Stege ist zwar hoch, führte jedoch zu keinen Elektromigrationsschäden.

### Degradation

Bei thermischer Alterung wurde eine kritische Degradation der Sensorperformance durch einen gestiegenen Package-Innendruck gemessen. Ursache sind hierbei Ausgasprozesse im Package, durch die die thermische Isolierung sinkt, der TCR geringfügig sinkt und der elektrische Widerstand steigt. Dies führt zu einer reduzierten thermischen Empfindlichkeit über die Lebenszeit. Über die Analyse der physikalischen Hintergründe dieser Effekte konnten Optimierungspotentiale zur Minimierung der Degradation hergeleitet werden. Mit Hilfe durchgeführter Degradationsversuche wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das die Degradation über Zeit und Temperatur für verschiedene Applikationsszenarien berechnen kann. Weiterhin konnte bei beschleunigter Alterung eine Verringerung des Bildrauschens ermittelt werden, die wiederum einen positiven Einfluss auf den NETD Wert der Sensoren hat. Damit reduziert sich dieser nicht um den vollen Betrag der Responsivitätsänderung.

### Prüfsystem

Auf Grundlage der in dieser Arbeit untersuchten Fehlermechanismen wurde ein Zuverlässigkeitsprüfsystem entwickelt. Dieses nutzt innovativerweise die Bolometer selbst, um den Innendruck des Package zu bestimmen. Dadurch können Performanceverluste, Package-Schäden, elektrische Defekte oder defekte Pixel und damit alle relevanten Fehlermechanismen überwacht werden. Die Messung erfolgt mit einem schnell durchführbaren Selbsttest ohne zusätzlich benötigte Peripherie und ermöglicht einen automatischen Zuverlässigkeitsprüfaufbau. Weiterhin sind auf Grund der entwickelten Temperaturkompensation hohe Genauigkeiten erreichbar und ein Einsatz in der Infrarotkamera möglich.

Mit dieser entwickelten Prüfmethode können Defekte, Performancedegradationen oder Pixeldefekte im Betrieb der Kamera detektiert und damit ggf. kompensiert werden. Diesen schnellen Selbsttest kann die Kamera über ihre Lebenszeit nach Bedarf durchführen und somit ihre Bildqualität und Langzeitstabilität wesentlich verbessern.

### Ausblick

Die in dieser Arbeit gemessene Reduzierung des Rauschens über die beschleunigte Alterung, konnte mit den hier beschriebenen Modellen theoretisch nicht begründet werden. Daher wäre eine weitere Untersuchung der Ursachen dieses Effekts interessant.

In zukünftigen Untersuchungen könnten die Optimierungspotentiale zur Minimierung der Performancedegradation implementiert und validiert werden. Zudem könnten auch die deutlich größeren VGA oder XGA Sensoren auf ihre Zuverlässigkeit, vor allem im Hinblick auf die Stabilität des Packages, untersucht werden.

Weiterhin kann der automatische Zuverlässigkeitsprüfaufbau mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methode aufgebaut und getestet werden. Ebenso kann der Einsatz in einer Infrarotkamera implementiert und validiert werden. Dabei wäre es auch interessant, zu untersuchen, wie die Messwerte genutzt werden

können um Degradationen der Performance oder Pixelfehler zu erkennen und wie per Software die Bildqualität und Genauigkeit verbessert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] F. Niklaus, C. Vieider und H. Jakobsen, „MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays – A Review,“ in *Proc. of SPIE Vol. 6836, 68360D-1*, 2007.
- [2] A. Utz, Entwicklung einer automatischen Testumgebung für Ferninfrarot-Baelemente, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2012.
- [3] M. Douglass, „DMD reliability: a MEMS success story,“ in *SPIE 4980:1-11*, 2003.
- [4] M. Madou, „Fundamentals of Microfabrication,“ CRC Press, 1997.
- [5] E. A. Amerasekera, Failure Mechanisms in Semiconductor Devices: Second Edition, New York: John Wiley Sons, 1997.
- [6] Wyatts, „Badewanneneffekt,“ 2012. [Online]. Available: wikipedia: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bathtub\\_curve\\_de.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bathtub_curve_de.svg).
- [7] C. F. Dunn und J. W. McPherson, „Temperature-cycling Acceleration Factors for Aluminium Metallization Failure in VLSI Applications,“ Texas Instruments Inc.m M/S 681, Houston Texas, 1990.
- [8] L. Gerville-Reache und M. Nikulin, „Some Recent Results on Accelerated Failure Time Models with Time-Varying Stresses,“ in *Quality Technology & Quantitative Management Vol. 4, No. 1*, Bordeaux, France, Université Victor Segalen Bordeaux2, 2006, pp. pp. 143-155.
- [9] N. M. Sedyakin, „On one physical principle in reliability theory,“ in *Techn. Cybernetics, 3*, 1966, pp. 80-87.
- [10] D. M. Tanner, T. B. Parson, A. Corwin, J. Walraven, J. Wittwer, B. Boyce und S. Winzer, „Science-based MEMS reliability methodology,“ Elsevier, 2007.
- [11] R. Müller-Fiedler, U. Wagner und W. Bernhard, „Reliability of MEMS – a methodical approach,“ in *Microelectronics Reliability 42 Elsevier Science Ltd*, 2002.
- [12] Fraunhofer IMS, „Annual report of the Fraunhofer-Institute for microelectronic circuits and systems IMS Duisburg 2013,“ 2013. [Online]. Available:

[http://www.ims.fraunhofer.de/fileadmin/user/presse/jahresberichte/IMS\\_AnnualReport2011\\_klein.pdf](http://www.ims.fraunhofer.de/fileadmin/user/presse/jahresberichte/IMS_AnnualReport2011_klein.pdf).

- [13] U. Paschen, W. Heiermann und H. Vogt, „Robuste und zuverlässige Chip-Scale Aufbau- und Verbindungstechnik,“ Vortrag, gehalten auf der DLR-Bauteilekonferenz in Freiburg am 9./10.04.14 , Freiburg Deutschland, 2014.
- [14] R. Rongen, R. Roucou, P. vd Wel, F. Voogt, F. Swartjes und K. Weide-Zaage, „Reliability of Wafer Level Chip Scale Packages,“ Elsevier Microelectronics Reliability, 2014.
- [15] ZVEI, „handbook for robustness validation of semiconductor devices in automotive applications, 2nd ed.,“ ZVEI, 2013.
- [16] JEDEC, „JESD94A; Application specific qualification using knowledge based test methodology,“ JEDEC, 2011.
- [17] H. Budzier und G. Gerlach, Thermal Infrared Sensors: Theory, Optimisation and Practice, John Wiley & Sons, 2011.
- [18] P. Kruse und D. Skatrud, Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems, Academic Press, Semiconductors and semimetals Vol. 47, 1997.
- [19] A. Rogalski, Infrared Detectors, Second Edition, CRC Press, 2010.
- [20] C. Li, G. Skidmore und e. al, „Recent development of ultra small pixel uncooled focal plane arrays at DRS,“ Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII, 65421Y, 2007.
- [21] B. Backer und M. Kohin, „ Advances in uncooled technology at BAE SYSTEMS,“ Proc. SPIE 5074, Infrared Technology and Applications XXIX, 548, 2003.
- [22] R. Blackwell, T. Bach und e. al, „17  $\mu\text{m}$  pixel 640 x 480 microbolometer FPA development at BAE Systems,“ Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII, 65421U, 2007.
- [23] D. Murphy, M. Ray, J. Wyles und e. al, „640  $\times$  512 17  $\mu\text{m}$  microbolometer FPA and sensor development,“ Proc. SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII, 65421Z, 2007.
- [24] N. Butler, R. Murphy, R. Silva, C. Marshall und R. Blackwell, „Low Cost Uncooled Microbolometer Imaging System for Dual Use,“ Proc. SPIE 2552, Infrared Technology XXI, 583, 1995.
- [25] J. Tissot, S. Tinnes und A. e. a. Durand, „High-performance uncooled amorphous silicon video graphics array and extended graphics array infrared focal plane arrays with 17- $\mu\text{m}$  pixel pitch,“ SPIE Opt. Eng. 0001;50(6):061006-061006-7, 2011.
- [26] M. Moraja, M. Amiotti und H. Florence, „Chemical Treatment of Getter Films on Wafers Prior to Vacuum,“ Reliability, Testing, and Characterization of

- MEMS/MOEMS III, Proceedings of SPIE Vol. 5343, 2004.
- [27] N. Roxhed, F. Niklaus, A. Fischer und e. al, „Low-Cost Uncooled Microbolometers for Thermal Imaging,“ Optical Sensing and Detection, Proc. of SPIE Vol. 7726 772611-1, 2010.
- [28] F. Niklaus, C. Jansson, A. Decharat und S. G., „Performance Model for Uncooled Infrared Bolometer Arrays and Performance Predictions of Bolometers Operating at Atmospheric Pressure, Infrared Physics and Technology,“ Infrared Physics and Technology, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2007.08.001>.
- [29] C. Premachandran, C. Chong, T. Chai und M. Iyer, „Vacuum packaging development and testing for an uncooled IR bolometer device,“ in Proc. 54th Electron. Compon. Technol. Conf., pp. 951–955, 2004.
- [30] A. Schaufelbuhl, N. Schneeberger, U. Munch, M. Waelti, O. Paul, O. Brand und e. al., „Uncooled low-cost thermal imager based on micromachined CMOS integrated sensor array,“ Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.10, No.4, pp.503-510, 2001.
- [31] B. Fiset, C. Chevalier, A. Lepine und e. al, „Design and fabrication of a scalable high-reliability vacuum sealed package for infrared detectors,“ IEEE, 2012.
- [32] Y. Huang, A. Vasan, R. Doraiswami und M. Osterman, „MEMS Reliability Review,“ IEEE Transactions on device and materials reliability, Vol. 12, NO. 2, 2012.
- [33] A. Roming und P. McWhorter, „Opportunities and challenges in MEMS commercialization,“ Vacuum Coating and Technology Magazine, Berlin, 2001.
- [34] Y. Chen, S. M. Guertin, B. Pain und S. Kayaii, „CMOS Active Pixel Sensor Technology and Reliability Characterization Methodology,“ Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Dr, Pasadena, CA 91 109, 2006.
- [35] J. De Natale und R. Mihailovich, „RF MEMS Reliability,“ The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003.
- [36] C. Premachandran, S. Chong, S. Liw und R. Nagarajan, „Fabrication and Testing of a Wafer-Level Vacuum Package for MEMS Device,“ IEEE Transactions on advanced packaging Vol 32, 2009.
- [37] S. H. Choa, „Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes,“ Samsung Advanced Institute of Technology, MEMS Lab, Suwon 440-600, South Korea, 2003.
- [38] M. S. Choia und S. H. Choab, „Experimental Reliability Estimation and Improvement,“ Key Engineering Materials Vols. 297-300 pp 588-593, Trans

- Tech Publications, Schweiz, 2005.
- [39] S. Bhattacharya und A. Hartzell, „Optical microelectromechanical systems: designing for reliability,“ SPIE conference on Reliability, Packaging, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS VI, San Jose, Calif., 2007.
  - [40] E. Bogatin, D. Potter und L. Peters, Roadmaps of Packaging Technology, Integrated Circuit Engineering Corporation, 1997.
  - [41] S. Murali, N. Srikanth und C. Vath, „Effect of wire size on the formation of intermetallics and Kirkendall voids on thermal ageing of thermosonic wire bonds,“ Mater Letter 58:3096-101, 2004.
  - [42] C. Breach und e. al., „Reliability and failure analysis of gold ball bonds in fine and ultra-fine pitch application,“ Proc SEMICON Singapore, 2004.
  - [43] H.-S. Chang, K.-C. Hsieh, T. Martens und A. Yang, „Wire-bond void formation during high temperature aging,“ IEEE ISSN: 1521-3331, 2004.
  - [44] G. Harman, „Wire bonding in microelectronics. 2nd ed.,“ McGraw-Hill, New York, 1997.
  - [45] P. W. Kruse, „Uncooled IR focal plane arrays,“ Opto-Electronics Review 7, 1999.
  - [46] P. L. Marasco und E. L. Dereniak, „Uncooled infrared sensor performance,“ Proceedings of SPIE, San Diego, USA, vol. 2020, 1993.
  - [47] R. A. Wood, „Uncooled microbolometer infrared sensor arrays,“ Infrared Emitters and Detectors, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 2001.
  - [48] J. Albers, Grundlagen integrierter Schaltungen Bauelemente und Mikrostrukturierungen, Carl Hanser Verlag München, 2007.
  - [49] A. Christou, Elektromigration and Electronic Device Degradation, John Wiley & Sons, 1994.
  - [50] JEDEC Publication, „JEP122G - Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices,“ JEDEC Solid State Technology Association, 2010.
  - [51] A. Middendorf, „Lebensdauerprognostik unter Berücksichtigung realer Belastungen am Beispiel von Bondverbindungen bei thermomechanischen Wechselbeanspruchungen,“ Dissertation Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin, Berlin, 2010.
  - [52] D. Young und A. Christou, „Failure Mechanism Models for Electromigration,“ IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, 1994.
  - [53] J. Tao, N. W. Cheung und C. Hu, Modeling Electromigration Failures in TiN/Al-alloy/TiN Interconnects and TiN Thin Films, Berkeley, CA94720: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, IEEE, 1995 .



- 
- [54] P. Bell, C. W. Hoover und S. J. Pruchnic, „Standard NETD test procedure for FLIR systems with video outputs,“ in *Gerald C. (Hrsg.): Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IV Bd*, SPIE, 1993, pp. 194-205.
- [55] „Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement,“ 2008. [Online]. Available: [http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf).
- [56] F. Niklaus, C. Jansson, A. Decharat, J.-E. Källhammer, H. Pettersson und G. Stemme, „Uncooled Infrared Bolometer Arrays Operating in a Low to Medium Vacuum Atmosphere: Performance Model and Tradeoffs,“ *Proc. SPIE 2007, Vol.6542*, pp.1M.1-1M, Orlando USA, 2007.
- [57] P. W. Kruse, „Can the 300 K radiating background noise limit be attained by uncooled thermal imagers ?,“ in *Proc. SPIE 2004, Vol.5406*, pp.437-446, Orlando, USA, 2004.
- [58] M. Kohin und N. Buttler, „Performance limits of uncooled VOx microbolometer focal plane arrays,“ in *Proc. SPIE 2004, Vol. 5406*, pp. 447-453, Orlando, USA, 2004.
- [59] D. Würfel, Rauscharme Ausleseschaltungen für die FIR-Sensorik, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2009.
- [60] M. Stutzmann, „Data on hydrogen in a-Si:H from diffusion and effusion studies,“ [Amorphous Silicon and its Alloys], Searle, T., ed., EMIS Datareviews Series, No. 19, INSPEC, p.66, 1998.
- [61] R. e. a. Collins, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc*, Vol. 762, A10.1.1, 2003.
- [62] S. Ajmera, J. Brady, C. Hanson, T. Schimert, A. Syllaios und M. Taylor, „Performance improvement in amorphous silicon based uncooled microbolometers through pixel design and materials development,“ *Proc. SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII*, 80121L, 2011.
- [63] S. Ajmera, A. Syllaios, G. Tyber, M. Taylor und R. Hollingsworth, „Amorphous silicon thin-films for uncooled infrared microbolometer sensors,“ *Proc. SPIE 7660, Infrared Technology and Applications XXXVI*, 766012, 2010.
- [64] D. Solutions, „Processing and Reliability Issues for Eutectic AuSn Solder Joints,“ *IMAPS - International Microelectronics And Packaging Society*, from the 41st International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2008) Proceedings, pg. 909-916, 2008.
- [65] G. Matijasevic, C. C. Lee und C. Y. Wang, „Au-Sn alloy phase diagram and properties related to its use as a bonding medium,“ *Thin solid films*, 223(1993), pp 276-287, 2003.
- [66] M. Hutter, „Verbindungstechnik höchster Zuverlässigkeit für

- optoelektronische Komponenten," Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, Fraunhofer Verlag, genhemigte Dissertation.
- [67] S. Anhöck, H. Oppermann, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, L. Thomas und H. Reichl, „Investigations of Au/Sn alloys on different end-metallizations for high temperature applications," IEEE/CPMT Berlin Int Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1998.
- [68] IPC-SM-785, „Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments," IPC, 1992.
- [69] T. Tollefsen, A. Larsson, O. Lovvik und K. Aasmundtveit, „Au-Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities," The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2011, 2011.
- [70] T. B. Massalski und H. W. King, „Acta Metall vol 8 rr 677-683," 1960.
- [71] F. Yost, M. Karnowsky, W. Drotning und J. Gieske, „Metall. Trans. A, vol. 21A, pp. 1885–89," 1990.
- [72] G. Kamiadakis, A. Beskok und N. Alum, „Microflows and nanoflows: fundamentals and simulations," Springer, New York, 2005.
- [73] S. Yang und W. Tao, „Heat transfer," 3rd edn. Higher Education Press, Beijing, 1998.
- [74] B. Xiao, T. Dong, E. Halvorsen, Z. Yang, N. Hoivik, D. Gu, N. Tran und H. Jakobsen, „Integrated micro Pirani gauge based hermetical package monitoring for uncooled VOx bolometer FPAs," Springer, Microsyst Technol (2011) 17:115–125, 2010.
- [75] G. Chen, „Nanoscale energy transport and conversion," New York: Oxford University Press, 2005.
- [76] T. Dong und Z. Yang, „Measurement and modeling of R141b condensation heat transfer in silicon rectangular microchannels," J. Micromech. Microeng., vol. 18, pp. 12-27, 2008.
- [77] C. S. Premachandran, N. Khan, Z. Xiaowu, C. S. Chong und T. C. Chai, „Design & development of a new thermally stable high vacuum IR bolometer package," in Proc. 53rd Electron. Compon. Technol. Conf., pp. 392–396, 2003.
- [78] S. Garcia-Blanco, K. LeFoulgoc, Y. Desroches, S. Caron, P. Topart, C. Alain und H. Jerominek, „Wafer-level hermetic vacuum micro packaging technology for IR detector applications," in Proc. IEEE LEOS Annu. Meet. Conf., pp. 57–58, 2009.
- [79] J. L. de Segovia, „Physics of outgassing," Instituto de Fisica Aplicada, CETEF, L. Torres Quevedo, CSIC, Madrid, Spain.
- [80] B. Wang, S. Tanaka, B. Guo, G. Vereecke, S. Severi, Mitvrouw, M. Mevers und I. De Wolf, „Outgassing study of thin films used for poly-SiGe based vacuum

- packaging of MEMS," Elsevier Ltd, 2011.
- [81] K. Jousten, „THERMAL OUTGASSING," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, <http://cds.cern.ch/record/455558/files/p111.pdf>, Berlin, Germany.
- [82] Becarlson, „Wikipedia," 28 03 2011. [Online]. Available: [http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Pressure\\_exerted\\_by\\_collisions.svg](http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Pressure_exerted_by_collisions.svg). [Zugriff am 31 08 2014].
- [83] H. Greenhouse, „Hermeticity of Electronic Packages," William Andrew publishing, 2000.
- [84] R. Ramesham und R. C. Kullberg, „Review of vacuum packaging and maintenance of MEMS and the use of getters therein," Paper 08157SSR published online, pp 7-8, 2009.
- [85] M. Puttock, „Problems and solutions for low pressure, high density, inductively coupled plasma dry etch application," Surf Coat Technol, 1997.
- [86] S. D. Gendt, I. Snee, I. Cornelissen, M. Lux, R. Vos, P. W. Mertens und e. all, „A novel resist and post-etch residue removal process using ozonated chemistries," 1998 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers, 1998.
- [87] B. Savornin, X. Bailin und et.al., „New method to evaluate materials outgassing used in MEMS thin film packaging technology," Microelectronic Engineering 107 (2013) 97–100 Elsevier, 2012.
- [88] Y. Cheng, W. Hsu, K. Najafi, C. Nguyen und L. Lin, „Vacuum packaging technology using localized aluminum/ silicon-to-glass bonding," J Microelectromech Syst 2002; 11(50):556–65., 2002.
- [89] A. Roth, „Vacuum technology," North-Holland Publishing, 1976.
- [90] K. Minami, T. Moriuchi und M. Esashi, „Cavity pressure control for critical damping of packaged micro mechanical devices," Transducer'95 8th Int Conf Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden, 1995.
- [91] C. Benvenuti, P. Chiggiato, F. Cicoira und Y. L'Aminot, „Nonevaporable getter films for ultrahigh vacuum applications," J Vac Sci Technol 1998;A16(1):148–54., 1998.
- [92] J. Mitchell, G. Lahiji und K. Najafi, „Long-Term Reliability, Burn-In and Analysis of outgassing in Au-Si eutectic Wafer-Level Vacuum packages," Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop Hilton Head Island, South Carolina, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2006.
- [93] B. Savornin, X. Baillin und et.al., „Outgassing Characterization of ME MS Thin Film Packaging Materials," Electronic Components & Technology Conference, 2013 IEEE, CEA, LETI, MINATEC, 17, rue des Martyrs – 38054 Grenoble Cedex 9, France, 2013.

- [94] A. Gerlach, W. Keller, J. Schulz und K. Schumacher, „Gas permeability of adhesives and their application for hermetic packaging of microcomponents,“ *Microsystem Technologies* Vol. 7 Springer Verlag, 2000.
- [95] S. Brown, W. Arsdell und C. Muhlstein, „Materials Reliability in MEMS Devices,“ *Proc. IEEE Intl. Conf. On Solid State Sensors and Actuators*, Chicago, IL, 1997.
- [96] D. Tanner, J. Walraven, K. Helgesen, L. Irwin, D. Gregory, J. Stake und N. Smith, „MEMS reliability in a vibration environment,“ *38th Annual Intl. Reliability Physics Symposium*, San Jose, CA.
- [97] M. Douglass, „MEMS Reliability - Coming of Age“, *Reliability, Packaging, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS VII*,“ *Proc. of SPIE* Vol. 6884, 2008.
- [98] B. Stark, „MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications,“ *JPL Publication 99-1*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1999.
- [99] M. Tabib-Azar, K. Wong und W. Ko, „Aging Phenomena in heavily doped (p+) micromachined silicon cantilever beams,“ *Sensors and Actuators A*, Vol. 33, pp. 199-206, 1992.
- [100] C. L. Muhlstein, R. T. Howe und R. Ritchie, „Fatigue of polycrystalline silicon for microelectromechanical system applications: crack growth and stability under resonant loading conditions,“ *Mech Mater*, 2004.
- [101] L. Li, J. Xie, M. Ahmad und M. Brillhart, „Environmental Effects on Dielectric Films in Plastic Encapsulated Silicon Devices,“ *IEEE ECTC*, 2007.
- [102] S. Salemi, L. Yang, J. Dai und J. Bernstein, „Physics-of-Failure Based Handbook of Microelectronic Systems,“ *RIAC*, 2008.
- [103] S. Tadigadapa und N. Najafi, „Reliability of Microelectromechanical Systems (MEMS),“ *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS*, *Proceedings of SPIE* Vol. 4558 (2001) © 2001 SPIE • 0277-786X/01/\$15.00, 2001.
- [104] J. Breibach, „Robustness Validation- Design for Reliability; Neue Aspekte des Anforderungsmanagements für Halbleiterbauelemente,“ *Robert Bosch GmbH*.
- [105] Toshiba, „Semiconductor Reliability [2],“ <http://www.semicon.toshiba.co.jp/eng/product/reliability/handbook/index.html>, 2011.
- [106] J. Wilde, „Testverfahren und Qualifikation Methoden des Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagements,“ *Skriptum zur Vorlesung Sommersemester 2005*, IMTEK, Aufbau- und Verbindungstechnik, Institut für Mikrosystemtechnik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Georges-Köhler-Allee 103, D-79085 Freiburg, 2005.

- 
- [107] JESD22-A103, „High Temperature Storage Life,“ JEDEC Standard, 2001.
- [108] JESD22-A104, „Temperature Cycling,“ JEDEC Standard, 2005.
- [109] U. Wagner, J. Franz, M. Schweiker, W. Bernhard, R. Müller-Fiedler, B. Michel und et.al, „Mechanical reliability of MEMS-structures under shock load,“ *Microelectron Reliab* 2001;41:1657–62, 2001.
- [110] X. Xiong, Y. Wu und W. Jone, „Material Fatigue and Reliability of MEMS Accelerometers,“ *IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance of VLSI Systems*.
- [111] JESD22-B103, „Vibration, Variable Frequency,“ JEDEC Standard, 2002.
- [112] JESD22-B104, „Mechanical Schock,“ JEDEC Standard, 2001.
- [113] JESD22-A108, „Temperature, Bias, and Operating Life,“ JEDEC Standard, 2005.
- [114] S. F. Gordon und e. al., „Moisture Effects on Package Cracking in PSMCs,“ *SME Quarterly* Vol. 3, No. 4..
- [115] R. Maboudian und R. T. Howe, „Critical Review: Adhesion in Surface Micromechanical Structures,“ *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 15, 1997.
- [116] JESD22-A102, „Accelerated Moisture Resistance - Unbiased Autoclave,“ JEDEC Standard, 2000.
- [117] A. R. Knudson, S. Buchner, P. McDonald, W. J. Stapor, A. B. Campbell, K. S. Grabowski, D. L. Knies, S. Lewis und Y. Zhao, „The Effects of Radiation on MEMS Accelerometers,“ *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, pp. 3122-3125, 1996.
- [118] Y. Saito, R. Griese, J. Kessler, R. Kono und J. Fang, „Hydrogen degradation of GaAs MMICs and hydrogen evolution in the hermetic package,“ *IEEE 1995 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp.*, 15–16 May 1995, pp. 119–122, Piscataway, NJ, 1995.
- [119] M. Elßner, „Vacuum quality evaluation for uncooled micro bolometer thermal imager sensors,“ *European Symposium on the Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF) <25*, Berlin, 2014.
- [120] Analog Devices Inc., „ADI Reliability Handbook,“ Norwood MA, 2000.
- [121] G. Elger, R. Jordan, M. Suchodoletz und H. Oppermann, „Development of an Low Cost Wafer Level Flip Chip Assembly Process for High Brightness LEDs Using the AuSn Metallurgy,“ *IMAPS International Symposium on Microelectronics*, Denver, 2002.
- [122] D. Yu, H. Oppermann, J. Kleff und M. Hutter, „Interfacial Metallurgical Reaction Between Small Flip-Chip Sn/Au Bumps and Thin Au/TiW Metallization Under Multiple Reflow,“ *Scripta Materialia* Materialia, Vol. 58,

pp. 606–609, 2008.

- [123] J. Kloeser, E. Zakei, F. Bechtold und H. Reichl, „Reliability Investigations of Fluxless Flip-Chip Interconnections on Green Tape Ceramic Substrates,“ IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A, Vol. 19, No. 1, pp. 24-33, 1996.
- [124] C. Wright, „The Effect of Solid-State Reactions upon Solder Lap Shear Strength,“ IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, Vol. PHP-13, No. 3, pp. 202-207, 1977.
- [125] J. Yoon, H. Chun und S. Jung, „Reliability Analysis of Au–Sn Flip-Chip Solder Bump Fabricated by Co-Electroplating,“ Journal of Materials Research, Vol. 22, No. 5, pp. 1219-1229, 2007.
- [126] J. D. Morrow, „Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals,“ ASTM, Philadelphia, 1964.
- [127] S. S. Manson, „Thermal Stress and Low Cycle Fatigue,“ McGraw-Hill, New York, 1966.
- [128] M. Nese, R. W. Bernstein, I. Johansen und R. Sporren, „New method for testing hermeticity of silicon sensor structures Sensors Actuators,“ A 53 349–52, 1996.
- [129] D. Lellouchi und e. al., „A new method for the hermeticity testing of wafer-level packaging,“ iopscience.iop.org, 2010.
- [130] Q. Li, H. Goosen, F. van Keulen, J. van Beek und G. Zhang, „Assessment of testing methodologies for thin-film vacuum MEMS,“ Springer Link, Microsystem Technologies, 2009, Volume 15, Number 1, Page 161, 2008.
- [131] A. Bosseboeuf, J. P. Grandchamp, C. Breluzeau, S. Lani, J. Palomo und D. Bouville, „Vacuum measurement in wafer level encapsulations by interference microscopy,“ Springer-Verlag, 2005.
- [132] C. Jansson, U. Ringh und K. Liddiard, „Theoretical analysis of pulse bias heating of bolometers and effectiveness of pulse bias compensation,“ Proceedings of SPIE, vol. 2552, San Diego USA, 1995.
- [133] M. M. Sisto, S. García-Blanco, L. L. Noc, B. Tremblay, Y. Desroches, J.-S. Caron, F. Provencal und F. Picard, „Pressure sensing in vacuum hermetic micropackaging,“ Proc. of SPIE Vol. 7592, 759204 © 2010 SPIE • CCC code: 0277-786X/10/\$18, 2010.
- [134] T. Tsuchiya, O. Tabata, J. Sakata und Y. Taga, „Specimen Size Effect on Tensile Strength of Surface-Micromachined Polycrystalline Silicon Thin Films,“ Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, 1998.
- [135] L. J. Broutman und R. H. Krock, „Modern Composite Materials,“ Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1967.

- 
- [136] FIDES, „FIDES Guide 2009,“ 2009. [Online]. Available: <http://fides-reliability.org/>.
- [137] M. Giraudeau, F. Bayle und G. Pelloquin, „FIDES Acceleration Factors,“ *RAMS 2011 Session 14E*, 2011.
- [138] B. Dodson, „The Weibull Analysis Handbook,“ Amer Society for Quality, Auflage: 2, 2006.
- [139] M. Madou, „Fundamentals of Microfabrication,“ *CRC Press, Boca Raton*, 1997.
- [140] C. Marxer, M. Gretillat und P. Vogel, „Reliability considerations for electrostatic polysilicon actuators using as an example the REMO Component,“ *Sensors and Actuators A*, 71, pp. 153-157, 1998.
- [141] R. Kazinczi, J. Mollinger und A. Bossche, „Reliability of Silicon Nitride as Structural Material in MEMS,“ *Proc. Conf. on Device Characterization in Micromachining II*, SPIE 3875, pp. 174-183, 1999.
- [142] S. Garcia-Blanco, P. Cote, M. Leclerc, N. Blanchard, Y. Desroches und J. Caron, „Design, manufacturing, and qualification of an uncooled microbolometer focal plane array–based radiometric package for space applications,“ *Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2010.
- [143] D. Sparks, S. Massoud-Ansari und N. Najafi, „Reliable Vacuum Packaging Using NanoGetters™ and Glass Frit Bonding,“ *Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS III Proceedings of SPIE Vol. 5343*, 2004.
- [144] C. Premachandran, S. Chong, T. Chai und M. Iyer, „Vacuum Packaging development and testing for an uncooled IR bolometer device,“ *IEEE*, 2004.