



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG

Untersuchung des Einflusses von Probenpräparationsverfahren auf die mechanische
Spannung im Silizium mittels Raman-Spektrometer

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

Naturwissenschaftliche Fakultät II
Chemie, Physik und Mathematik

Verteidigt am 29.11.2021

Tim Schaffus

Geboren am 21.06.1989 in Frankfurt (Oder)

Gutachter

Prof. Dr. Ralf Wehrspohn

Prof. Dr. Matthias Petzold

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Wolter

Kurzfassung

Die Doktorarbeit gliedert sich in zwei große Themenbereiche. Der erste Teil befasst sich mit der Leistungsfähigkeit beziehungsweise den Grenzen des kommerziellen konfokalen Raman-Mikroskops (HORIBA LabRAM HR Evolution), bezüglich der Spannungsmessungen. Dazu zählt unter anderem die Bestimmung der möglichen Auflösung der Verspannung, welche durch die Informationstiefe im Silizium sowie die räumliche und spektrale Auflösung begrenzt ist.

Für die quantitative Bestimmung der Spannung ist die Kenntnis einiger Geräteparameter notwendig. Dazu gehören zum Beispiel die Stabilität der Laserleistung, die Verschiebung des Silizium-Peaks durch thermische Einflüsse (thermischer Drift) und die Laserleistung auf der Probe.

Im zweiten Teil der Doktorarbeit werden die Einflüsse unterschiedlicher Probenpräparationsverfahren auf die mechanischen Spannungen im Silizium untersucht. Ziel war es, ein fertig aufgebautes elektronisches Bauteil so zu präparieren, dass der ursprüngliche Spannungszustand im darin enthaltenen Siliziumchip nur geringfügig beeinflusst wird. Dazu wurden Spannungsmesschips in der Prototypenfertigung bei Infineon über folgende Prozessschritte aufgebaut: „Die Attach“, „Wire Bonding“ und „Molding“. Nach jedem Vorgang wurde ein Träger (Leadframe) aus der Prozessreihe entnommen und untersucht. Somit war es möglich, den Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die Spannungen im Silizium mit Hilfe der Raman-Mikroskopie zu untersuchen. Durch die Verwendung des Spannungsmesschips konnten die intrinsischen Spannungen neben der Untersuchung mittels Raman-Spektroskopie auch elektronisch ausgelesen werden. Zusätzlich war es möglich, den fertig vergossenen (gemoldeten) Chip und die Änderung des Spannungszustandes während der Prozessierung zu erfassen. Dadurch konnte genau überprüft werden, ob sich der Spannungszustand im Silizium durch die einzelnen Präparationsmethoden ändert.

Zu allen Versuchen wurden Simulationen mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms ANSYS durchgeführt, um die Plausibilität der Messungen und der daraus abgeleiteten Spannungswerte analytisch zu überprüfen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1. Einleitung und Motivation	1
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Silizium als Halbleitermaterial	3
2.2. Raman-Spektroskopie	5
2.2.1. Der Raman-Effekt	5
2.2.2. Mechanische Spannungen im Silizium	10
2.3. Der Spannungsmesschip basierend auf dem piezo-resistiven Effekt	50
2.4. Die Finite Elemente Simulation	66
2.4.1. Finite Elemente Methode (FEM)	66
2.4.2. Modellvorstellungen	66
3. Experimentelle Untersuchungen	72
3.1. Experimenteller Aufbau und Durchführung	72
3.2. Stabilität und Zuverlässigkeit des Raman-Spektrometers	75
3.2.1. Informationstiefe im Silizium	75
3.2.2. Stabilität des Lasers und der Referenzquelle	83
3.2.3. Einfluss der verschiedenen Messparameter auf die Messung	86
3.2.4. Wahl der Messparameter	92
3.3. Ergebnisse der Raman-Messungen	95
3.3.1. Einfluss der Probenpräparation	95
3.3.2. Prozessbegleitender Aufbau eines Modellchips	101
3.3.3. Partielle Dekapsulierung	115
3.4. Stabilität und Zuverlässigkeit der elektrischen Messungen	123
3.4.1. Messsystem Nadeltester	123
3.4.2. Messsystem Spannungsmesschip	130
3.4.3. Biegeversuch	132
3.4.4. Schlussfolgerungen für die elektrischen Messungen	146
3.5. Ergebnisse aus den elektrischen Messungen	149
3.5.1. Einfluss der Probenpräparation	149
3.5.2. Aufbau eines Modellchips	151
3.5.3. Partielle Dekapsulierung	166
3.6. Simulationsergebnisse der verschiedenen Experimente	181
3.6.1. Simulation der Prozessschritte	181
3.6.2. Simulation des partiellen Dekapsulierens	192

3.7. Ergebnisse zusätzlicher Analysen	197
3.8. Zusammenfassung der Ergebnisse	208
3.8.1. Untersuchung der Messsysteme	208
3.8.2. Probenpräparation	211
3.8.3. Chipaufbau	212
3.8.4. Partielles Dekapsulieren	219
4. Diskussion	223
4.1. Messung mechanischer Spannungen mittels Raman-Spektroskopie und piezo-resistiver Messmethode an prozessierten Siliziumchips	223
4.1.1. Erkenntnisse dieser Arbeit	223
4.1.2. Grenzen der einzelnen Messmethoden	230
4.2. Ausblick	232
Literaturverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XXII
Symbolverzeichnis	XXIII
Angaben zur Person	XXIX
Zur Person	XXIX
Akademischer Werdegang	XXIX
Eidesstattliche Erklärung	XXX

1. Einleitung und Motivation

Im heutigen Zeitalter sind Mobiltelefone nicht mehr weg zu denken. Seit der Jahrhundertwende, wo nur 30 % der Haushalte in Deutschland ein Mobiltelefon besaßen, waren es im Jahr 2018 bereits knapp 97 % (Statistisches Bundesamt, 2019). Jeder möchte immer und überall erreichbar sein. Allerdings reicht es mittlerweile nicht mehr aus, jederzeit telefonisch erreichbar zu sein. Vielmehr geht es darum, zu jedem Zeitpunkt Zugriff auf möglichst viele Informationen über das Internet wie beispielsweise soziale Medien, Wissen oder mediale Inhalte zu haben. Die sogenannten Smartphones, welche die „normalen“ Mobiltelefone abgelöst haben, machen dies möglich. Im Jahr 2016 lag in Deutschland der Anteil an Smartphones von den Mobiltelefonen bereits bei über 80 % (comScore, 2019). Dabei muss laut Umfragen ein Smartphone vieles können. Vor allem sollte es möglichst dünn sein, aber gleichzeitig auch eine lange Akkulaufzeit haben (ifD Allensbach, 2019). Dies funktioniert allerdings nur, wenn der Platzbedarf der Halbleiterbauelemente, welche für die Funktionalität der Smartphones zuständig sind, bei zunehmender Komplexität immer geringer wird (Hilleringmann, 2014).

Ein anderes Beispiel ist die Elektromobilität, welche in der heutigen Zeit immer beliebter wird. So verfünffachte sich die Anzahl der zugelassenen Elektroautos seit Bekanntwerden der Abgas-Affäre 2015 der Volkswagen AG (ZSW, 2019). Auch hier sind ebenso wie bei den Smartphones hochintegrierte Schaltungen notwendig. Diese finden in den Fahrzeugen zum Beispiel in der Steuerungselektronik für die Akkus Anwendung und müssen einerseits ein enormes Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit erfüllen, dürfen gleichzeitig aber nur sehr geringe Platzdimensionen haben.

In solchen innovativen mikroelektronischen Bauteilen können durch die Verwendungen von Schichtsystemen mit unterschiedlichen Materialien, welche aneinandergrenzen und unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen, intrinsische Spannungen entstehen. Der thermische Ausdehnungskoeffizient spielt bei einzelnen Prozessen, die Temperaturprofile (Aufheizen, Abkühlen) beinhalten, eine große Rolle. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten einzelner Materialien ziehen sich die Schichten in einem System unterschiedlich stark zusammen beziehungsweise dehnen sich unterschiedlich stark aus. Durch die zunehmende Miniaturisierung und die immer komplexer werdende Funktionalität steigt die Anzahl der Schichten in solch einem System immer weiter an. Da das Platzangebot für diese Systeme hingegen immer kleiner wird, müssen die einzelnen Schichten zwangsläufig immer dünner werden. Dadurch steigt aber auch der Einfluss der

unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten auf die mechanische Spannung im System deutlich an. Diese mechanischen Spannungen beeinflussen die Zuverlässigkeit und die Leistung maßgeblich, da sie schlimmstenfalls zu Materialversagen führen können. Um die Entstehung und den Einfluss solcher mechanischen Spannungen in Bauteilen zu verstehen und sich sogar zu Nutze zu machen (Pastewka, et al., 2009), ist es notwendig, diese Spannungen messen zu können.

Der Hauptbestandteil dieser Doktorarbeit ist die Untersuchung solcher intrinsischen mechanischen Spannungen, welche bei der Herstellung und beim Prozessieren eines elektronischen Halbleiterbauteils entstehen. Dabei soll eine Analysemethode verwendet werden, welche es zum einen möglich macht intrinsische Spannungen bei geringer Informationstiefe mit einer sehr hohen lateralen Auflösung zu messen und welche zum anderen zerstörungsfrei ist (Hilleringmann, 2014).

Diese Anforderungen werden durch die Raman-Spektroskopie erfüllt. Sie ist ein Verfahren, welches die Wellenlängenänderung durch die inelastische Streuung eines auf die Probe gestrahlten Lasers misst. Aus der Wellenlängenänderung beziehungsweise aus der Verschiebung eines charakteristischen Peaks (Siliziumpeak bei $520,6 \text{ cm}^{-1}$) ist es möglich, die mechanische Spannung eines kristallinen Materials zu bestimmen. Voraussetzung für das Bestimmen der mechanischen Spannung ist neben der Kenntnis des Raman-Tensors und der Kristallstruktur des zu untersuchenden Materials (Hilleringmann, 2014) auch der optische Zugang zum Messbereich. Da dieser bei üblich vergossenen elektrischen Halbleiterbauteilen nicht gegeben ist, wird auch nach geeigneten und verfügbaren Methoden gesucht, die das Silizium für Raman-Messungen zugänglich machen, ohne dabei die intrinsische Spannung im Silizium selbst zu verändern.

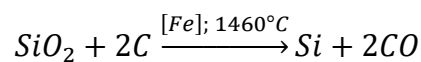
Letzten Endes soll eine Methode entwickelt werden, bei der die Raman-Spektroskopie verwendet wird, um intrinsische Spannungen in einem fertigen Bauteil zu untersuchen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Silizium als Halbleitermaterial

Silizium ist eines der wichtigsten Materialien in der Halbleiterindustrie und steht im Gegensatz zu Germanium oder Gallium als nahezu unerschöpfliche Quelle zur Verfügung. Es kommt zu 27,72 Gewichtsprozent in der Erdkruste vor und ist dadurch relativ günstig. (Hilleringmann, 2014)

Die Herstellung von Silizium findet in sogenannten Lichtbogenöfen statt, in welchen Quarz (Siliziumdioxid) durch Reduktion mit Kohlenstoff unter sehr hoher Temperatur (1460 °C) entsteht. Das Vorhandensein von Eisen verhindert die Reaktion von Silizium mit dem Kohlenstoff und wirkt gleichzeitig als Katalysator (Hilleringmann, 2014).



Bei der Herstellung von elektrischen Bauelementen muss das Silizium meistens in einkristalliner Form vorliegen. Einkristallin bedeutet, dass die Gitterstruktur und damit die Anordnung der Atome im Gitter des Siliziums regelmäßig sein muss. Silizium besitzt ein kubisch-flächenzentriertes Gitter (Abbildung 1a). Die Kristallstruktur ist gleich der Struktur eines Diamantkristalls (Abbildung 1b), da auch der Siliziumkristall aus zwei um 1/4 im Raum verschobenen Gittern besteht. Die Miller'schen Indizes, welche in Abbildung 2 zu sehen sind, beschreiben die Orientierung des Kristallgitters zur Oberfläche. Diese werden durch die Bildung der Reziproken der Schnittpunkte von der Ebene oder Oberfläche mit den Koordinatenachsen und dem anschließenden Berechnen des kleinsten ganzzahligen Verhältnisses bestimmt (Hilleringmann, 2014).

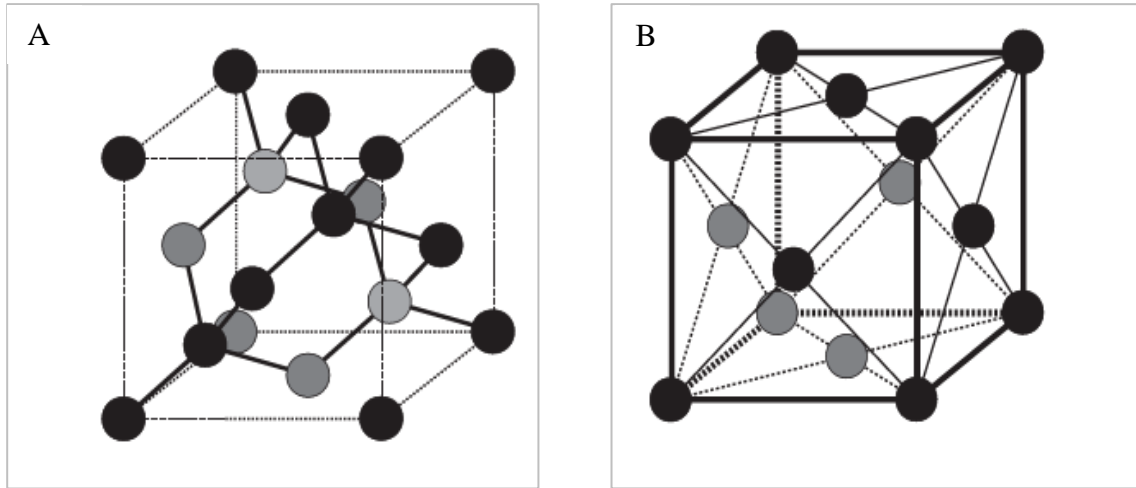


Abbildung 1: Darstellung der Gitterstruktur (A) und der Kristallstruktur (B) von Silizium (Hilleringmann, 2014)

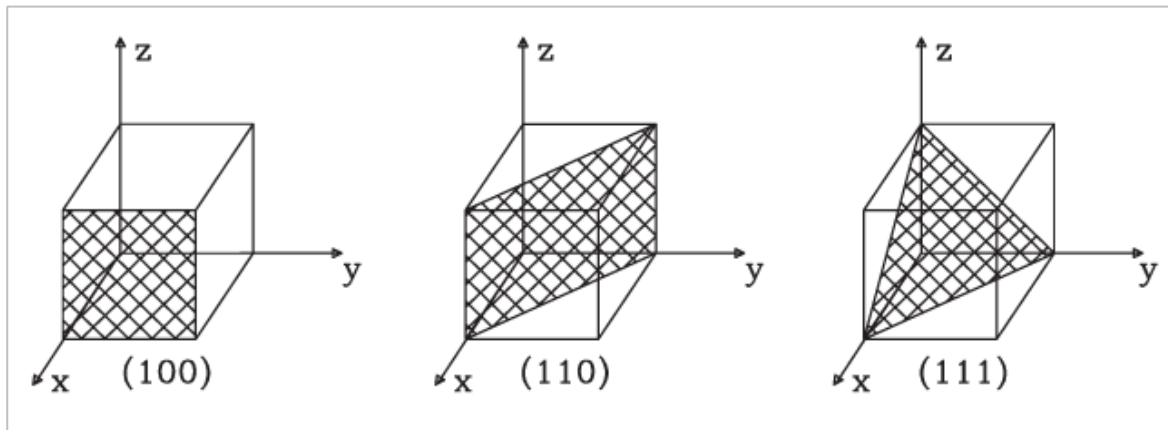


Abbildung 2: Darstellung der Kristallebenen von Silizium mit den Miller'schen Indizes (Hilleringmann, 2014)

2.2. Raman-Spektroskopie

2.2.1. Der Raman-Effekt

Der Raman-Effekt wurde nach einem seiner Entdecker und späteren Nobelpreisträger C. V. Raman benannt. Dieser hatte im Jahre 1928 zusammen mit K. S. Krishnan den Effekt entdeckt und erstmals beschrieben (Wermelinger, 2009).

Zur Beschreibung des Raman-Effekts kann das klassische Bild der Lichtstreuung herangezogen werden (Dieing, et al., 2010). Trifft Licht in Form von Photonen auf Phononen, beeinflusst das schwingende elektromagnetische Feld des Lichtes das molekulare System der Phononen, in dem das elektrische Feld auf die Ladungsträgerverteilung im Molekül einwirkt und so ein Dipolmoment induziert. Die Summe aller induzierten Dipolmomente (Polarisation) ist wiederum die Quelle des vom Molekül ausgesendeten elektrischen Feldes in Form von Licht (Dieing, et al., 2010).

Der Raman-Effekt basiert also auf der Streuung zwischen Photonen und Phononen. Dabei wird das Phonon angeregt und auf einen virtuellen Energiezustand angehoben. Dieser Zustand liegt zwischen dem energetischen Grundzustand und dem ersten verfügbaren Energieniveau. Das Phonon nimmt dabei Energie auf und fällt nach kurzer Zeit unter Abgabe von Energie in den energetischen Grundzustand zurück (Wermelinger, 2009).

In Abbildung 3 sind die drei unterschiedliche Streu-Mechanismen zu sehen.

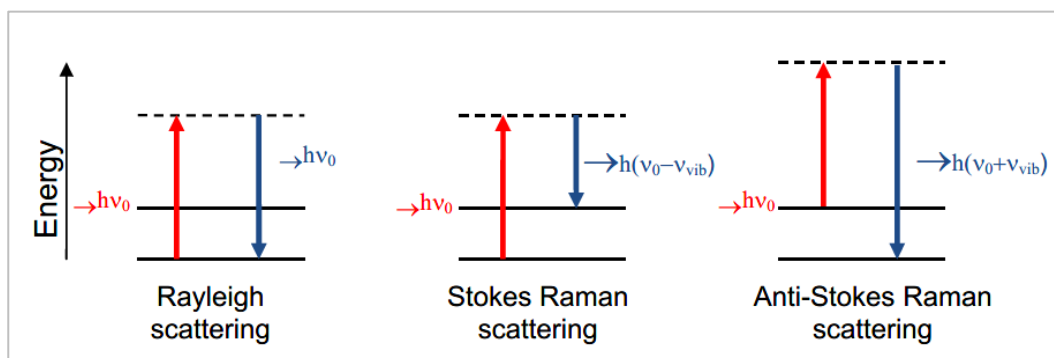


Abbildung 3: Darstellung der unterschiedlichen Streu-Mechanismen von einem Photon mit einem Phonon (Wermelinger, 2009)

Bei der Rayleigh-Streuung ist die Energie, welche das Phonon aufnimmt und die Energie beim Zurückfallen in den Grundzustand gleich groß. Befindet sich das Phonon in einem angeregten Zustand und wird anschließend durch Energiezufuhr in einen virtuellen Zustand angeregt, so

fällt es danach sofort wieder in den Grundzustand zurück. Dabei gibt es mehr Energie ab, als es durch die Anregung aufgenommen hat. Es kommt zu einer sogenannten Blauverschiebung der emittierten Strahlung, das heißt zu einer Verschiebung hin zu höheren Wellenlängen. Man spricht von der Anti-Stokes-Streuung. Bei der Stokes-Streuung hingegen kommt es zu einer Rotverschiebung der emittierten Strahlung, das heißt zu einer Verschiebung hin zu niedrigeren Wellenlängen (Otting, 1952); (Dieing, et al., 2010). Dabei gibt das Phonon weniger Energie ab, als es aufgenommen hat, da es nicht in den energetischen Grundzustand zurückfällt, sondern auf einem höheren Energieniveau verbleibt. Das in dieser Doktorarbeit nachfolgend verwendete Raman Spektrometer misst die Stokes-Streuung.

Mathematisch betrachtet, ergibt sich das induzierte Dipolmoment μ eines Moleküls aus einem Proportionalitätsfaktor α und dem elektrischen Feld E . Der Proportionalitätsfaktor α steht für die Polarisierbarkeit eines Moleküls und ist ein Tensor dritter Ordnung (Dieing, et al., 2010).

$$\vec{\mu} = \tilde{\alpha} \cdot \vec{E} \quad [1]$$

Das elektrische Feld selbst ist definiert als:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [2]$$

Die Polarisierbarkeit in einem Molekül befindet sich nicht im Gleichgewicht, da sie durch die Kernbewegung und die Elektronendichte im Zusammenhang mit der gegenwärtigen Kerngeometrie beeinflusst wird. Hintergrund ist, dass ein Molekülsystem immer das Bestreben hat, den niedrigsten Energiezustand zu erreichen. Um das Schwanken Q der Polarisierbarkeit α um den Gleichgewichtspunkt Q_0 zu beschreiben, kann in der Mathematik die Taylorreihe verwendet werden.

$$\alpha = \alpha(Q) = \alpha_0 + \sum_{q=1}^N \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial q \partial q'} \right)_{q_0 q'_0} \cdot q \cdot q' + O(q^3) \right] \quad [3]$$

Q steht dabei für die Summe aller möglichen Zustände q (normale Schwingungsmoden) des Systems. Die Molekülrotation wird nicht berücksichtigt, da diese in der klassischen Theorie nicht angeregt wird (Dieing, et al., 2010).

Q selbst als Schwingungsmode wird analog zu [2] beschrieben durch:

$$q = q_0 \cdot \cos(\omega_q \cdot t) \quad [4]$$

Setzt man nun die Gleichungen [2] und [3] in [1] ein, so erhält man:

$$\mu(t) = \alpha_0 + \sum_{q=1}^N \left[\left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial q \partial q'} \right)_{q_0 q'_0} \cdot q \cdot q' + O(q^3) \right] \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [5]$$

Betrachtet man stellvertretend für alle möglichen Schwingungsmoden nur eine Mode q und setzt für diese dann die Gleichung [4] ein, ergibt sich aus [5] folgender vereinfachter Ausdruck:

$$\mu(t) = \left[\alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot (q_0 \cdot \cos(\omega_q \cdot t)) \right] \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [6]$$

Multipliziert man nun die Gleichung [6] aus, so erhält man:

$$\mu(t) = \alpha_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot (q_0 \cdot \cos(\omega_q \cdot t)) \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [7]$$

$$= \alpha_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_q \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [8]$$

$$= \alpha_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \left(\frac{1}{2} (\cos(\omega_q \cdot t - \omega_0 \cdot t) + \cos(\omega_q \cdot t + \omega_0 \cdot t)) \right) \quad [9]$$

→ *Multiplikationsregeln von Winkelfunktion*

$$= \alpha_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \left(\frac{1}{2} (\cos((\omega_q - \omega_0) \cdot t) + \cos((\omega_q + \omega_0) \cdot t)) \right) \quad [10]$$

$$= \alpha_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \left(\cos((\omega_q - \omega_0) \cdot t) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial q} \right)_{q_0} \cdot q_0 \cdot \vec{E}_0 \cdot \cos((\omega_q + \omega_0) \cdot t) \right) \quad [11]$$

Das induzierte Dipolmoment wird in Abhängigkeit von der Zeit durch drei Faktoren (drei Summanden) beeinflusst (Gleichung [11]). Der erste Summand zeigt, dass die Moleküle in derselben Frequenz schwingen wie die Anregungsfrequenz ω_0 . Das entspricht der oben beschriebenen Rayleigh-Streuung (elastische Streuung). Die Rayleigh-Streuung enthält allerdings keine Informationen über die Freiheitsgrade des Moleküls und ist für alle Moleküle ungleich Null, was wiederum bedeutet, dass die Polarisierbarkeit ebenfalls ungleich Null ist. Der zweite Term zeigt, dass die Frequenz des zurückgestreuten Lichtes kleiner ist, als die Frequenz des anregenden Lichts ($\omega_q - \omega_0$). Wie bereits zuvor erwähnt, entspricht dieser Term der Stokes-Streuung. Demnach ist der dritte Summand laut Definition die Anti-Stokes-Streuung, da hier die Frequenz des gestreuten Lichts größer ist, als die des eingestrahnten Lichts ($\omega_q + \omega_0$) (Dieing, et al., 2010).

Zusätzlich zu den drei Streu-Varianten kann man aus Gleichung [11] für die inelastische Streuung (zweiter und dritter Summand) schlussfolgern, dass die Ableitung der

Polarisierbarkeit nicht Null sein kann ($\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\mu}\right) \neq 0$). Dies dient auch als Auswahlregel für die Entscheidung, ob ein Material oder eine Substanz Raman-aktiv ist oder nicht (Abbildung 4). Dazu zählen zum Beispiel die in Abbildung 4 (a) dargestellte symmetrische Streckschwingung eines homogenen zweiatomigen Moleküls oder die in 4 (b) dargestellte symmetrische Streckschwingung eines linear dreiatomigen Moleküls. Im Falle von 4 (a) besitzt das Molekül unter der Voraussetzung, dass nur Vibrationsschwingungen betrachtet werden, aufgrund seiner Symmetrie kein permanentes Dipolmoment. Solange das Molekülsystem nur geringfügig entlang der Normalen schwingt, ändert sich das Dipolmoment nicht, womit die Ableitung des Dipolmoments Null wird. Zusätzlich ändert sich die Polarisierbarkeit in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den Molekülen. Bei einem linearen dreiatomigen Molekül, ändert sich das Dipolmoment bei beiden Bindungspartnern (links und rechts) gleichermaßen, nur mit anderen Vorzeichen. Das bedeutet ein konstantes Dipolmoment für das gesamte Molekülsystem (Abbildung 4 (b)). (Dieing, et al., 2010).

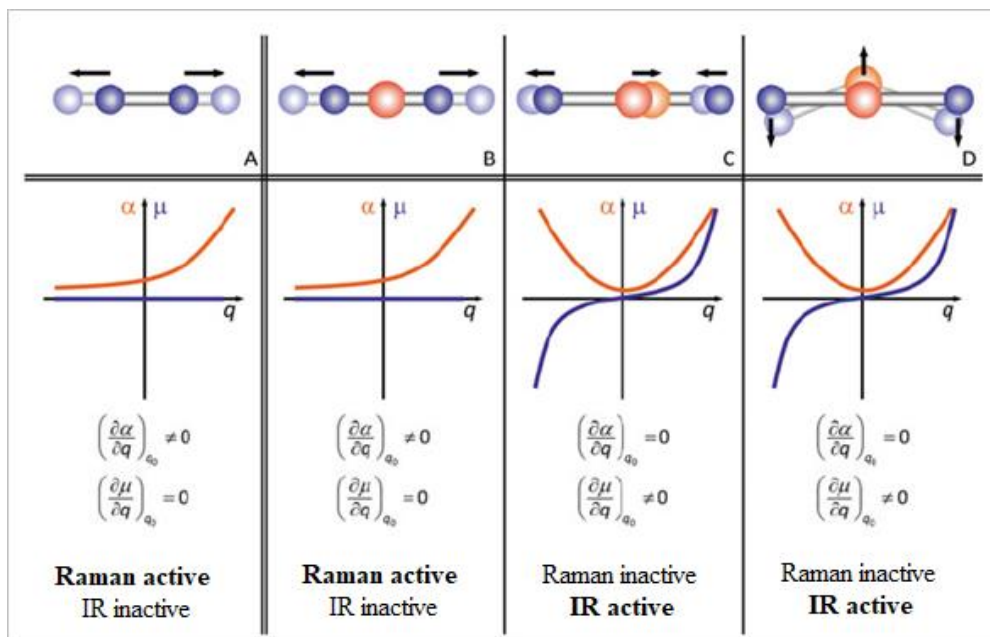


Abbildung 4: Auswahlregeln für Raman- und IR-aktive Materialien (Dieing, Hollricher, & Toporski, 2010)

2.2.2. Mechanische Spannungen im Silizium

Für die Bestimmung der biaxialen Spannung ($\sigma_{11} + \sigma_{22}$) wurde in dem europäischen Projekt e-BRAINS (Best-Reliable Ambient Intelligent Nanosensor Systems by Heterogeneous Integration) (Pufall, et al., 2012) folgende Annahme für das Kristallkoordinatensystem gemacht.

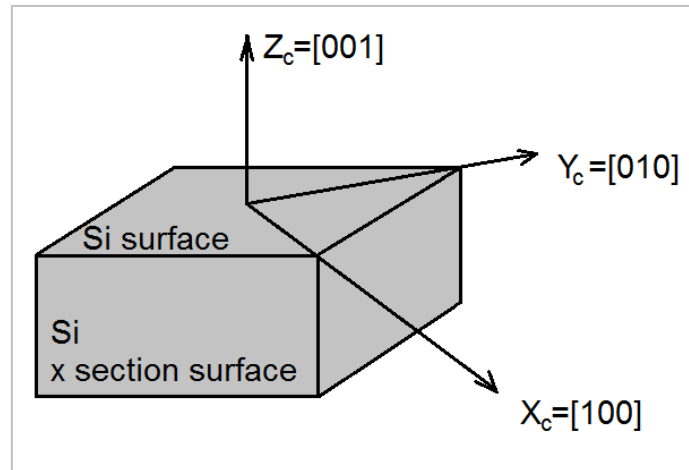


Abbildung 5: Kristallkoordinatensystem bei einer [100]-orientierten Siliziumoberfläche (Pufall, et al., 2012)

Um die intrinsische mechanische Spannung aus einer Peak-Verschiebung zu berechnen, wird zunächst angenommen, dass sich die Intensität der Raman-Streuung über das Verhältnis vom Raman-Tensor und dem Polarisationsvektor des einfallenden und des gestreuten Laserlichts bestimmt:

$$I = C \sum_j |e^{in} \cdot R_j \cdot e^{out}|^2 \quad [12]$$

Wobei I die Intensität der Raman-Streuung, e^{in} und e^{out} die Polarisationsvektoren jeweils vom eingestrahnten und zurückgestreuten Licht, C eine Konstante und R_j der Raman-Tensor sind. Für Silizium sehen die drei aktiven (jeweils eine für jede Achsen-Richtung im kartesischen Koordinatensystem) Raman-Tensoren als diamant-ähnliches Material wie folgt aus (De Wolf, et al., 1992):

$$R_x(TO_1) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d \\ 0 & d & 0 \end{pmatrix}; R_y(TO_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 \end{pmatrix}; R_z(LO) = \begin{pmatrix} 0 & d & 0 \\ d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad [13]$$

Für den in Abbildung 5 gezeigten Fall, dass sich die Raman-Streuung in Richtung der Z-Ebene ([001]-Richtung) ausbreitet, werden unter der Voraussetzung, dass e^{in} senkrecht zu e^{out} ist, nur die longitudinal optischen Phononen gemessen (De Wolf, 2015).

Die Frequenz der longitudinalen optischen Mode von nicht mechanisch verspanntem Silizium beträgt $\omega_0=520,6\text{cm}^{-1}$. Dieser Siliziumpeak verschiebt sich je nach Spannung zu größeren oder kleineren Wellenzahlen (Ganesan, et al., 1970), (De Wolf, 2015):

$$\sum_{\beta} K_{\alpha\beta} \cdot \eta_{\beta} = \omega^2 \cdot \eta_{\alpha} \quad (\alpha, \beta = 1,2,3) \quad [14]$$

Wobei η_{α} und η_{β} für die kartesischen Koordinaten des Eigenvektors stehen, $K_{\alpha\beta}$ für die Kraftkonstante der Elemente α und β des Tensors und ω für die Frequenz. Die Elemente der Kraftkonstante können als Kräfte der Dehnung beschrieben werden. Dazu werden $\varepsilon_{\nu\sigma}$ als Element des Dehnungstensors und das Kronecker-Delta $\delta_{\alpha\beta}$ eingeführt.

$$K_{\alpha\beta} = K_{\alpha\beta}^{(0)} + \sum_{\nu\sigma} \varepsilon_{\nu\sigma} \cdot K_{\nu\sigma\alpha\beta}^{(\varepsilon)}; K_{\alpha\beta}^{(0)} = \omega_0^2 \cdot \delta_{\alpha\beta} \quad [15]$$

Überträgt man die Gleichung [15] in die Tensor Notation, so erhält man (De Wolf, 2015):

$$\begin{pmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ K_{33} \\ K_{23} \\ K_{31} \\ K_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{1111} & K_{2211} & K_{3311} & K_{2311} & K_{3111} & K_{1211} \\ K_{1122} & K_{2222} & K_{3322} & K_{2322} & K_{3122} & K_{1222} \\ K_{1133} & K_{2233} & K_{3333} & K_{2333} & K_{3133} & K_{1233} \\ K_{1123} & K_{2223} & K_{3323} & K_{2323} & K_{3123} & K_{1223} \\ K_{1131} & K_{2231} & K_{3331} & K_{2331} & K_{3131} & K_{1231} \\ K_{1112} & K_{2212} & K_{3312} & K_{2312} & K_{3112} & K_{1212} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [16]$$

Für Silizium ist der Krafttensor symmetrisch und besitzt nur drei unabhängige Komponenten:

$$\begin{aligned} K_{1111}^\varepsilon &= K_{2222}^\varepsilon = K_{3333}^\varepsilon = p \\ K_{1122}^\varepsilon &= K_{1133}^\varepsilon = K_{2233}^\varepsilon = q \\ K_{1212}^\varepsilon &= K_{1313}^\varepsilon = K_{2323}^\varepsilon = r \end{aligned} \quad [17]$$

Nutzt man diese Vereinfachung und setzt sie in Gleichung [16] ein, so erhält man:

$$\begin{pmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ K_{33} \\ K_{23} \\ K_{31} \\ K_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & q & q & 0 & 0 & 0 \\ q & p & q & 0 & 0 & 0 \\ q & q & p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [18]$$

Die neun Tensoren unten links und oben rechts sind aufgrund der Kristallsymmetrie des Siliziums Null (Nye, 1985).

Verwendet man die Gleichung [14] und wendet diese auf das in Abbildung 5 festgelegte Koordinatensystem an, so erhält man unter der Voraussetzung, dass die Eigenvektoren entlang

der Koordinatenachsen X, Y, Z verlaufen und dass die Summe der drei Eigenvektoren Null sein muss, folgende Gleichung:

$$\begin{vmatrix} K_{11} - \omega^2 & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} - \omega^2 & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} - \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad [19]$$

Setzt man nun die Gleichung [18] in die Gleichung [19] ein, erhält man für die Eigenvektoren unter der zusätzlichen Annahme (Formel [20]) von (Ganesan, et al., 1970) folgende Ausdrücke [21] bis [24] (Ganesan, et al., 1970), (De Wolf, 2015), (Cerdeira, et al., 1972):

$$\lambda = \omega^2 - \omega_0^2 \quad [20]$$

$$K_{11} - \omega^2 = (p\varepsilon_{11} + q\varepsilon_{22} + q\varepsilon_{33} + 0 \cdot 2\varepsilon_{23} + 0 \cdot 2\varepsilon_{31} + 0 \cdot 2\varepsilon_{12} + \omega_0^2) - \omega^2 \quad [21]$$

$$= p\varepsilon_{11} + q\varepsilon_{22} + q\varepsilon_{33} + \omega_0^2 - \omega^2 \quad [22]$$

$$= p\varepsilon_{11} + q\varepsilon_{22} + q\varepsilon_{33} - \lambda \quad [23]$$

$$= p\varepsilon_{11} + q(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) - \lambda \quad [24]$$

Analog zu den Gleichungen [21] bis [24] für $K_{11}-\omega^2$ können die Ausdrücke $K_{22}-\omega^2$ und $K_{33}-\omega^2$ wie folgt umgeformt werden:

$$K_{22} - \omega^2 = (q\varepsilon_{11} + p\varepsilon_{22} + q\varepsilon_{33} + 0 \cdot 2\varepsilon_{23} + 0 \cdot 2\varepsilon_{31} + 0 \cdot 2\varepsilon_{12} + \omega_0^2) - \omega^2 \quad [25]$$

$$= p\varepsilon_{22} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}) - \lambda \quad [26]$$

$$K_{33} - \omega^2 = (q\varepsilon_{11} + q\varepsilon_{22} + p\varepsilon_{33} + 0 \cdot 2\varepsilon_{23} + 0 \cdot 2\varepsilon_{31} + 0 \cdot 2\varepsilon_{12} + \omega_0^2) - \omega^2 \quad [27]$$

$$= p\varepsilon_{33} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) - \lambda \quad [28]$$

Setzt man die umgeformten Ausdrücke in die Matrix aus Formel [19] ein, so erhält man:

$$\begin{vmatrix} p\varepsilon_{11} + q(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) - \lambda & r \cdot 2\varepsilon_{12} + 0 & r \cdot 2\varepsilon_{31} + 0 \\ r \cdot 2\varepsilon_{12} + 0 & p\varepsilon_{22} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}) - \lambda & r \cdot 2\varepsilon_{23} + 0 \\ r \cdot 2\varepsilon_{31} + 0 & r \cdot 2\varepsilon_{23} + 0 & p\varepsilon_{33} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) - \lambda \end{vmatrix} \quad [29]$$

$$= 0$$

Bei dem in Abbildung 5 eingeführten Koordinatensystem wird angenommen, dass zum Beispiel die Peak-Verschiebung in Rückstreuung von der (100)-Siliziumoberfläche gemessen wurde. Demzufolge sind die Spannungstensoren entlang der Koordinatenachsen σ_{11} , σ_{22} und σ_{33} nicht Null und alle anderen Spannungskomponenten sowie die Scherspannung gleich Null (De Wolf, 2015).

$$\sigma_{11} \neq 0; \sigma_{22} \neq 0; \sigma_{33} \neq 0 \quad [30]$$

Da Silizium, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, eine kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur hat, kann für die Beziehung zwischen der Dehnung ε und der Spannung σ das Hook'sche Gesetz angewendet werden.

$$\varepsilon^c = S_c \cdot \sigma^c \quad [31]$$

Dabei steht S in der obigen Gleichung für die Nachgiebigkeit (Pufall, et al., 2012).

Wird angenommen, dass eine allgemein homogene Spannung σ_{ij} im Kristall zu einer allgemeinen Dehnung ε_{ij} des Kristalls führt, welche mit jeder Spannungskomponente verbunden ist, so gilt für die Dehnung:

$$\varepsilon_{11} = S_{1111} \cdot \sigma_{11} + S_{1112} \cdot \sigma_{12} + S_{1113} \cdot \sigma_{13} + S_{1121} \cdot \sigma_{21} + S_{1122} \cdot \sigma_{22} + S_{1123} \cdot \sigma_{23} + S_{1131} \cdot \sigma_{31} + S_{1132} \cdot \sigma_{32} + S_{1133} \cdot \sigma_{33} \quad [32]$$

Ähnlich verhält es sich mit den anderen acht Komponenten der Dehnung. Dadurch kann das Hook'sche Gesetz folgendermaßen formuliert werden (Nye, 1985):

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl} \quad [33]$$

Der Nachgiebigkeitstensor besitzt vier Indizes i, j, k und l (Pufall, et al., 2012). Unter der Voraussetzung, dass die Spannung σ_{ij} immer symmetrisch zu σ_{ji} ist, gilt $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Dadurch kann im Fall einer Scherspannung von $x_3=0$ folgende Gleichung für die Dehnung aufgestellt werden:

$$\varepsilon_{11} = S_{1112} \cdot \sigma_{12} + S_{1121} \cdot \sigma_{21} = (S_{1112} + S_{1121}) \cdot \sigma_{12} \quad [34]$$

Das bedeutet, dass S_{1112} und S_{1121} immer zusammen in einem Experiment auftreten müssen.

Demnach kann folgendes angenommen werden:

$$S_{ijkl} = S_{ijlk} \quad [35]$$

Nimmt man nun eine zu $x_3=0$ parallel liegende uniaxiale Verformung an, gilt für die Dehnung folgendes:

$$\varepsilon_{11} = S_{1133} \cdot \sigma_{33}; \varepsilon_{22} = S_{2233} \cdot \sigma_{33} \quad [36]$$

$$\varepsilon_{12} = S_{1233} \cdot \sigma_{33}; \varepsilon_{21} = S_{2133} \cdot \sigma_{33} \quad [37]$$

Somit gilt mit der Definition der Dehnungstensoren $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}$:

$$S_{1233} = S_{2133} \quad [38]$$

und damit zusätzlich zur Gleichung [16]:

$$S_{ijkl} = S_{jikl} \quad [39]$$

Durch die Symmetrie der Spannung kann eine Matrix-Notation angewendet werden, welche es möglich macht, den Nachgiebigkeitstensor mit vier Indizes umzuschreiben. Übrig bleibt ein Tensor, welcher nur noch zwei Indizes besitzt. Die in Tabelle 1 gezeigten Notationen erlauben es, die ersten beiden Indizes unter Berücksichtigung der in der Tabelle gezeigten Regeln zu ersetzen:

Tabelle 1: Matrix-Notation zum Ersetzen von zwei Indizes durch einen Index

tensor notation	11	22	33	23, 32	31, 13	12, 21
matrix notation	1	2	3	4	5	6

Darüber hinaus werden die Faktoren 2 und 4 eingeführt, wodurch Tensoren zusammengefasst werden können. Zusätzlich verhindert die Matrix-Notation, dass beim Zusammenfassen von Tensoren im Hook'schen Gesetz die Faktoren 2 und 4 auftauchen. Dies ist möglich, wenn:

Tabelle 2: Übersicht über die Regeln zur Verwendung der Faktoren 2 und 4

$S_{ijkl} = S_{mn}$	wenn m und n den Wert 1,2 oder 3 annehmen
$2S_{ijkl} = S_{mn}$	wenn weder m noch n den Wert 4,5 oder 6 annehmen
$4S_{ijkl} = S_{mn}$	wenn beide (m und n) den Wert 4,5 oder 6 annehmen

Bei Verwendung der Notationen aus Tabelle 1 und 2, können die Nachgiebigkeitstensoren im Hook'schen Gesetz (Formel [14]) als Tensor der Stufe 2 umgeschrieben werden:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, 6) \quad [40]$$

Demnach gilt dann für den Nachgiebigkeitstensor mit zwei Indizes folgende Matrixschreibweise (Nye, 1985):

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{pmatrix} \quad [41]$$

Setzt man als nächstes den Nachgiebigkeitstensor in das Hook'sche Gesetz ein und beschreibt zusätzlich die Dehnung und Spannung mit Hilfe eines Vektors, so entsteht folgender Ausdruck (Pufall, et al., 2012), (De Wolf, 2015):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad [42]$$

Der Faktor zwei vor der Dehnung kommt vom Tensorelement S_{44} , welches eigentlich als $S_{44}/2$ beschrieben wird. Der Grund dafür ist die Verschiebung des Dehnungsvektors im Raum, wodurch es zu einer Rotation der Vektoren kommt.

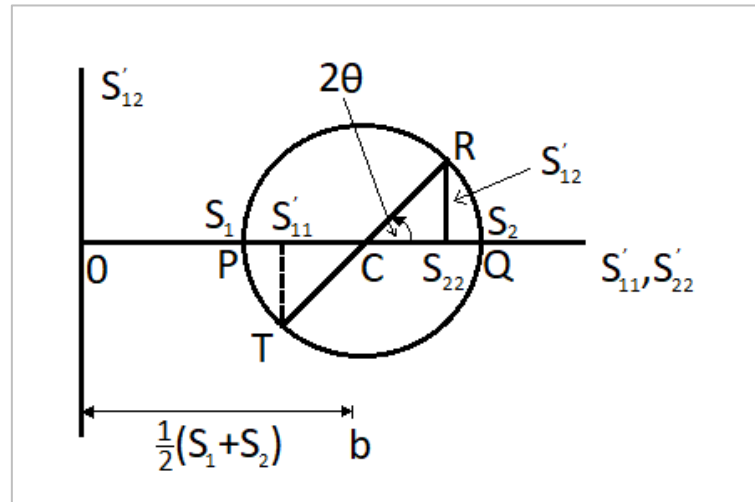


Abbildung 6: Mohr'scher Spannungskreis für den Fall, dass S_1 und S_2 positiv sind (Nye, 1985)

Somit kommt es laut dem Mohr'schen Spannungskreis für die Rotation zweier positiv gerichteter Tensoren (Abbildung 6) und unter Berücksichtigung, dass dieser Tensor immer als Summe aus einem antisymmetrischen und symmetrischen Tensor beschrieben wird, zu folgendem allgemeinen Ausdruck (Beispiel im zweidimensionalen Raum) (Nye, 1985):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) \\ \frac{1}{2}(e_{12} + e_{21}) & e_{22} \end{pmatrix} \quad [43]$$

Wie schon in Formel [40] beschrieben, sind die Spannungskomponenten entlang der Koordinatenachsen ungleich Null (triaxiale Spannung).

Daraus ergibt sich für das Hook'sche Gesetz folgende Schreibweise (De Wolf, 2015):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [44]$$

Für den Fall, dass eine uniaxiale Spannung (σ_{11}) entlang der [100]-Richtung angenommen werden kann, vereinfacht sich die Matrix [44] noch einmal, da nur das Spannungstensorelement σ_{11} ungleich Null ist:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [45]$$

Formuliert man diese Matrix Notation [45] aus, so erhält man folgende Ausdrücke für die einzelnen Tensoren der Dehnung (De Wolf, 2015):

$$\varepsilon_{11} = S_{11} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot 0 + S_{12} \cdot 0 = S_{11} \cdot \sigma_{11} \quad [46]$$

$$\varepsilon_{22} = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{11} \cdot 0 + S_{12} \cdot 0 = S_{12} \cdot \sigma_{11} \quad [47]$$

$$\varepsilon_{33} = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot 0 + S_{11} \cdot 0 = S_{12} \cdot \sigma_{11} \quad [48]$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{13} = 0 \quad [49]$$

Werden die erhaltenen Formeln für die Dehnung in die Gleichung [29] eingesetzt und wird außerdem das gewählte Koordinatensystem inklusive der Bedingung aus Gleichung [30] berücksichtigt, so erhält man zunächst:

$$\begin{vmatrix} p\varepsilon_{11} + q(\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) - \lambda & 0 & 0 \\ 0 & p\varepsilon_{22} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}) - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & p\varepsilon_{33} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) - \lambda \end{vmatrix} \quad [50]$$

$$= 0$$

Nach dem Einsetzen der Gleichungen [46] bis [49] in die obenstehende Gleichung [50] lauten die drei Lösungen für die Eigenwerte von λ_1 , λ_2 und λ_3 (Pufall, et al., 2012) wie folgt:

$$\lambda_1 = p(S_{11} \cdot \sigma_{11}) + q((S_{12} \cdot \sigma_{11}) + (S_{12} \cdot \sigma_{11})) \quad [51]$$

$$= (pS_{11} + 2qS_{12})\sigma_{11} \quad [52]$$

$$\lambda_2 = p(S_{12} \cdot \sigma_{11}) + q((S_{11} \cdot \sigma_{11}) + (S_{12} \cdot \sigma_{11})) \quad [53]$$

$$= (pS_{12} + qS_{11} + qS_{12})\sigma_{11} \quad [54]$$

$$= (qS_{11} + (p + q)S_{12})\sigma_{11} \quad [55]$$

$$\lambda_3 = p(S_{12} \cdot \sigma_{11}) + q((S_{11} \cdot \sigma_{11}) + (S_{12} \cdot \sigma_{11})) \quad [56]$$

$$= (qS_{11} + (p + q)S_{12})\sigma_{11} \quad [57]$$

Die Änderung der Wellenzahl durch den Einfluss der Spannung kann über (De Wolf, 2015):

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_0 \quad [58]$$

beschrieben werden. Da die Differenz der Wellenzahlen in der Regel kleiner ist als die Wellenzahl selbst, ist es möglich die Gleichung [58] zu vereinfachen:

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_0 = \frac{\lambda_i}{2\omega_0} \quad [59]$$

Setzt man die einzelnen Gleichungen [52], [55] und [57] zur Berechnung des Eigenvektors für die jeweilige Koordinatenachse in Gleichung [59] ein, so erhält man die Formeln zur Bestimmung der Frequenzänderung in Abhängigkeit der drei Tensorelemente und der Spannung in x-Richtung (De Wolf, 2015):

$$\Delta\omega_1 = \frac{\lambda_1}{2\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0} (pS_{11} + 2qS_{12})\sigma_{11} \quad [60]$$

$$\Delta\omega_2 = \frac{\lambda_2}{2\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0} (qS_{11} + (p + q)S_{12})\sigma_{11} \quad [61]$$

$$\Delta\omega_3 = \frac{\lambda_3}{2\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0} (qS_{11} + (p + q)S_{12})\sigma_{11} \quad [62]$$

Um zu bestimmen, welcher der drei Raman-Tensoren beziehungsweise welcher der drei Eigenvektoren aus den vorherigen Formeln [60] bis [62] mit der gewählten Polarisation gemessen werden kann, benötigt man die Intensität der drei Raman-Tensoren. Die Gesamtintensität der Raman-Streuung von Silizium ergibt sich aus (De Wolf, 2015):

$$I = C \sum_j d^2 \cdot f_j^2 \quad (j = 1,2,3) \quad [63]$$

Wobei der Vektor f_j^2 ein Bestandteil von f_c ist. f_j^2 erhält man durch die Rotation vom System S_ξ (System bei dem die Achsen x_ξ parallel zu den Polarisationsrichtungen longitudinal und transversal sind) in das System S' (allgemeines System). f_c ist wiederum ein geometrischer Faktor, der proportional zum Ergebnis der Summation über die Komponenten der Raman-Tensoren ist (Anastassakis, 1997). Dabei handelt es sich um die Raman-Tensor-Konstante (De Wolf, 2015). Für ein kristallografisch kubisches System wie Silizium ist es möglich, f_c über die

Polarisationsvektoren der einzelnen Achsen zu beschreiben (De Wolf, 2015) (Anastassakis, 1997):

$$f_c = \begin{pmatrix} f_1^c \\ f_2^c \\ f_3^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{2c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} + e_{3c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} \\ e_{3c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} + e_{1c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} \\ e_{1c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{2c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} \end{pmatrix} \quad [64]$$

Wobei der Vektor für das eingestrahlte Licht über:

$$e_c^{in} = \begin{pmatrix} e_{1c}^{in} \\ e_{2c}^{in} \\ e_{3c}^{in} \end{pmatrix} \quad [65]$$

und der Vektor für das zurückgestrahlte Licht über:

$$e_c^{out} = \begin{pmatrix} e_{1c}^{out} \\ e_{2c}^{out} \\ e_{3c}^{out} \end{pmatrix} \quad [66]$$

beschrieben wird. Daraus folgt, dass die Formel [63] unter Berücksichtigung der Gleichungen [64] bis [66] vereinfacht werden kann. Die aus der Vereinfachung entstandene Gleichung [67] kann dafür verwendet werden, die Intensität eines Raman-Peaks in Abhängigkeit der Polarisationsrichtung zu berechnen. Daraus kann geschlussfolgert werden, ob der jeweilige Peak in der gewählten Polarisationsrichtung messbar ist. (De Wolf, 2015).

$$I_j^c = d^2 f_j^{c2} \quad (j = 1,2,3) \quad [67]$$

Unter der Voraussetzung, dass das Laserlicht entlang der [001]-Achse (z-Richtung) eingestrahlt wird, kann man unter der Annahme, dass wie im gegebenen Fall nur die X- und Y-Komponenten der Polarisation ungleich Null sind, folgende Vereinfachung der Gleichung [64] vornehmen (De Wolf, 2015):

$$e_c^{in} = \begin{pmatrix} e_{1c}^{in} \\ e_{2c}^{in} \\ 0 \end{pmatrix} \quad [68]$$

$$e_c^{out} = \begin{pmatrix} e_{1c}^{out} \\ e_{2c}^{out} \\ 0 \end{pmatrix} \quad [69]$$

$$f_c = \begin{pmatrix} f_1^c \\ f_2^c \\ f_3^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{2c}^{in} \cdot 0 + e_{3c}^{in} \cdot 0 \\ 0 \cdot e_{1c}^{out} + e_{1c}^{in} \cdot 0 \\ e_{1c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{2c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} \end{pmatrix} \quad [70]$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ e_{1c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{2c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} \end{pmatrix} \quad [71]$$

Aus Gleichung [71] wird deutlich, dass für den zuvor angenommenen Fall nur der dritte Peak messbar ist. Wie zu Beginn bereits erwähnt, handelt es sich dabei um die longitudinal optische Mode des Siliziums. Daraus folgt, dass nur der dritte Eigenvektor (Formel [62]) für das Verhältnis zwischen den drei Spannungstensoren und der Peak-Verschiebung in Betracht gezogen werden muss (uniaxiale Spannung σ_{11} entlang der Z-Achse) (De Wolf, 2015) (Pufall, et al., 2012).

$$\Delta\omega_3 = \frac{\lambda_3}{2\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0} (qS_{11} + (p + q)S_{12})\sigma_{11} \quad [72]$$

Die Gleichung [72] zeigt, dass unter der Voraussetzung der uniaxialen Spannung ein linearer Zusammenhang zwischen der Wellenzahländerung und der mechanischen Spannung besteht. Für den Vergleich von Raman-Spektroskopie und piezo-resistiver elektrischer Messung ist die Betrachtung der Summenspannung deutlich relevanter als die uniaxiale Spannung, da die Summenspannung direkt von der Software zur Bestimmung der mechanischen Spannung aus den piezo-resistiven elektrische Messungen ausgegeben wird. Die Summenspannung bezieht sich dabei auf die sich in der Ebene befindlichen Spannungskomponenten σ_{11} und σ_{22} . Zur Herleitung der Beziehung zwischen der Summenspannung und der Wellenzahländerung muss analog zur Formel [33] die Spannung σ_{22} hinzukommen (Pufall, et al., 2012):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad [73]$$

Wird die Matrix Notation aus [73] ausformuliert, so erhält man folgende Ausdrücke:

$$\varepsilon_{11} = S_{11} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22} + S_{12} \cdot 0 = S_{11} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22} \quad [74]$$

$$\varepsilon_{22} = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{11} \cdot \sigma_{22} + S_{12} \cdot 0 = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{11} \cdot \sigma_{22} \quad [75]$$

$$\varepsilon_{33} = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22} + S_{11} \cdot 0 = S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22} \quad [76]$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{23} = \sigma_{13} = 0 \quad [77]$$

Durch das Einsetzen der Gleichungen [74] bis [77] in die Gleichung [29], erhält man den Ausdruck der folgenden Gleichung [78]. Hier wird bereits berücksichtigt, dass lediglich der dritte Si-Peak (Gleichung [71]) mit der hier verwendeten Messanordnung messbar ist (Pufall, et al., 2012).

$$\lambda = p \cdot (S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22}) + q \cdot ((S_{11} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22}) + (S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{11} \cdot \sigma_{22})) \quad [78]$$

$$= p \cdot S_{12} \cdot \sigma_{11} + pS_{12} \cdot \sigma_{22} + q \cdot (S_{11} \cdot \sigma_{11} + S_{12} \cdot \sigma_{22}) + q \cdot (S_{12} \cdot \sigma_{11} + S_{11} \cdot \sigma_{22}) \quad [79]$$

$$= pS_{12} \cdot \sigma_{11} + pS_{12} \cdot \sigma_{22} + qS_{11} \cdot \sigma_{11} + qS_{12} \cdot \sigma_{22} + qS_{12} \cdot \sigma_{11} + qS_{11} \cdot \sigma_{22} \quad [80]$$

$$= (pS_{12}) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + (qS_{11} + qS_{12}) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad [81]$$

$$= ((pS_{12}) + (qS_{11} + qS_{12})) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad [82]$$

$$= ((pS_{12}) + q \cdot (S_{11} + S_{12})) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad [83]$$

Die Gleichung [83] eingesetzt in die Formel [58] ergibt:

$$\Delta\omega_3 = \frac{\lambda_3}{2\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0} ((pS_{12}) + q \cdot (S_{11} + S_{12})) \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad [84]$$

Stellt man nun die Formel [84] nach $(\sigma_{11} + \sigma_{22})$ um, dann ist es möglich, die Summenspannung der Spannungskomponenten in der Ebene (σ_{11} und σ_{22}) aus der bestimmten Peak-Verschiebung ($\Delta\omega$) und der Peak-Position vom nicht verspannten Silizium (ω_0) zu berechnen:

$$(\sigma_{11} + \sigma_{22}) = \frac{\Delta\omega_3 \cdot 2\omega_0}{((pS_{12}) + q \cdot (S_{11} + S_{12}))} \quad [85]$$

In dieser Arbeit wurden nicht nur Raman-Spektroskopie-Messungen an der Oberfläche des Spannungsmesschips durchgeführt, sondern auch an den Seiten des Chips, zum Beispiel nach der Schliﬀpräparation. Da hier ein anderes Probenkoordinatensystem vorliegt (Abbildung 7), muss das Koordinatensystem aus Abbildung 5 und folglich auch die Annahmen und die daraus

geschlussfolgerten Formeln, in das neue Koordinatensystem transferiert werden. In dem neuen Koordinatensystem bewegt sich das zurückgestreute Licht entlang der Z_S -Achse (De Wolf, 2015).

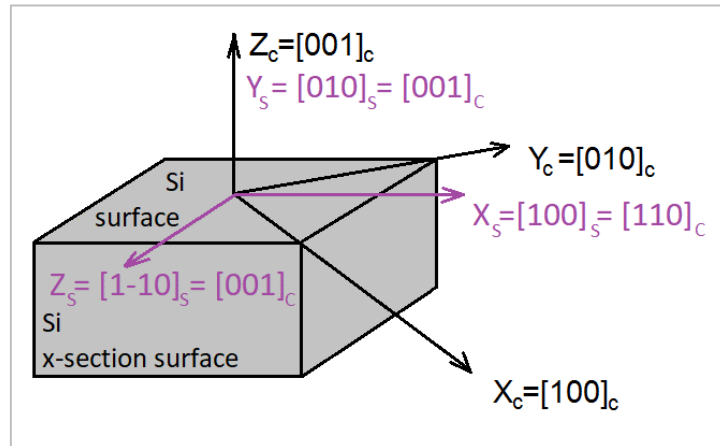


Abbildung 7: Änderung des Koordinatensystems zur Bestimmung der mechanischen Spannung aus der Peak-Verschiebung, welche auf einem Schliff gemessen wurde (Pufall, et al., 2012)

Durch das neu angenommene Koordinatensystem ändern sich die Achsen des Kristallsystems unter der Berücksichtigung, dass sich die Achsen Z_S und X_S im Vergleich zum vorher angenommenen Koordinatensystem um 45 Grad ($\sqrt{2}$) gedreht haben, wie folgt (De Wolf, 2015) (Pufall, et al., 2012):

$$X_c = \frac{1}{\sqrt{2}} [110]; Y_c = [001]; Z_c = \frac{1}{\sqrt{2}} [1\bar{1}0] \quad [86]$$

Für das Koordinatensystem des Schliffes gilt:

$$X_x = [100]; Y_x = [010]; Z_x = [001] \quad [87]$$

Zur Herleitung der Formel für die Bestimmung der mechanischen Spannung aus der Peak-Verschiebung wird von der Rotation vom Kristallsystem zum Koordinatensystem des Schliffes ausgegangen. Die Rotationsmatrix A_{Rot} vom Kristallsystem zum Probensystems R_{Rot} wird in

(Pufall, et al., 2012) mit Hilfe der transponierten Matrix realisiert. Damit ändert sich die Matrix A_{Rot} aus [74]:

$$A_{Rot} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad [88]$$

in R_{Rot} über (Pufall, et al., 2012):

$$R_{Rot} = A_{Rot}^T \quad [89]$$

$$R_{Rot} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \quad [90]$$

Für die Berechnung der Dehnung und der Spannung in einem anderen Koordinatensystem ist hier eine Tensorrotation notwendig. Die Transformation vom Kristallsystem zum Probensystem beschreibt (De Wolf, 2015) mit Hilfe eines kartesischen Tensors T zweiter Ordnung:

$$T_{ij}^S = R_{ik} \cdot R_{jl} \cdot T_{kl}^C \quad [91]$$

Die Gleichung [91] angewandt auf die Dehnung und die Spannung führt zu den Gleichungen [92] und [93]:

$$\varepsilon_{ij}^S = R_{ik} \cdot R_{jl} \cdot \varepsilon_{kl}^C \quad [92]$$

$$\sigma_{ij}^S = R_{ik} \cdot R_{jl} \cdot \sigma_{kl}^C \quad [93]$$

Schreibt man nun die Gleichungen [92] und [93] als Matrix und berücksichtigt dabei die Regeln aus Abbildung 8 (Bond, 1943) für das Bestimmen solcher Matrizen nach der Transformation

von Koordinatensystemen, so erhält man für die Formel zur Berechnung der Spannung und Dehnung: (De Wolf, 2015):

Entsprechende Terme zum Quadrat	Doppelte der entsprechende übrig gebliebenen Terme
Entsprechende übrig gebliebene Terme aus der transformierten Matrix	Summe des Kreuzproduktes der entsprechenden fehlenden Terme

Abbildung 8: Darstellung der Regeln für die Berechnung der einzelnen Terme in der Matrix zum Bestimmen der Matrix zur Ermittlung der Dehnung und Spannung (Bond, 1943)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^S \\ \sigma_{22}^S \\ \sigma_{33}^S \\ \sigma_{23}^S \\ \sigma_{31}^S \\ \sigma_{12}^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}^2 & R_{12}^2 & R_{13}^2 & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{13} & 2 \cdot R_{11} \cdot R_{13} & 2 \cdot R_{11} \cdot R_{12} \\ R_{21}^2 & R_{22}^2 & R_{23}^2 & 2 \cdot R_{22} \cdot R_{23} & 2 \cdot R_{21} \cdot R_{23} & 2 \cdot R_{21} \cdot R_{22} \\ R_{31}^2 & R_{32}^2 & R_{33}^2 & 2 \cdot R_{32} \cdot R_{33} & 2 \cdot R_{31} \cdot R_{33} & 2 \cdot R_{31} \cdot R_{32} \\ R_{21} \cdot R_{31} & R_{22} \cdot R_{32} & R_{23} \cdot R_{33} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ R_{11} \cdot R_{31} & R_{12} \cdot R_{32} & R_{13} \cdot R_{33} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ R_{11} \cdot R_{21} & R_{12} \cdot R_{22} & R_{13} \cdot R_{23} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{pmatrix} \quad [94]$$

$$\cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11}^C \\ \sigma_{22}^C \\ \sigma_{33}^C \\ \sigma_{23}^C \\ \sigma_{31}^C \\ \sigma_{12}^C \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^S \\ \varepsilon_{22}^S \\ \varepsilon_{33}^S \\ 2\varepsilon_{23}^S \\ 2\varepsilon_{31}^S \\ 2\varepsilon_{12}^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}^2 & R_{12}^2 & R_{13}^2 & R_{12} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{12} \\ R_{21}^2 & R_{22}^2 & R_{23}^2 & R_{22} \cdot R_{23} & R_{21} \cdot R_{23} & R_{21} \cdot R_{22} \\ R_{31}^2 & R_{32}^2 & R_{33}^2 & R_{32} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{32} \\ 2 \cdot R_{21} \cdot R_{31} & 2 \cdot R_{22} \cdot R_{32} & 2 \cdot R_{23} \cdot R_{33} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ 2 \cdot R_{11} \cdot R_{31} & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{32} & 2 \cdot R_{13} \cdot R_{33} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ 2 \cdot R_{11} \cdot R_{21} & 2 \cdot R_{12} \cdot R_{22} & 2 \cdot R_{13} \cdot R_{23} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{pmatrix} \quad [95]$$

$$\cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^C \\ \varepsilon_{22}^C \\ \varepsilon_{33}^C \\ 2\varepsilon_{23}^C \\ 2\varepsilon_{31}^C \\ 2\varepsilon_{12}^C \end{pmatrix}$$

Wobei D_{44} bis D_{66} in den Gleichungen [94] und [95] als Platzhalter für folgende Ausdrücke stehen (De Wolf, 2015):

$$\begin{pmatrix} D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{22} \cdot R_{33} + R_{23} \cdot R_{32} & R_{21} \cdot R_{33} + R_{31} \cdot R_{23} & R_{21} \cdot R_{32} + R_{31} \cdot R_{22} \\ R_{32} \cdot R_{13} + R_{12} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{13} + R_{11} \cdot R_{33} & R_{31} \cdot R_{12} + R_{11} \cdot R_{32} \\ R_{12} \cdot R_{23} + R_{22} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{23} + R_{21} \cdot R_{13} & R_{11} \cdot R_{22} + R_{21} \cdot R_{12} \end{pmatrix} \quad [96]$$

Die Gleichungen [94] und [95] können wie folgt geschrieben werden (De Wolf, 2015):

$$\sigma^S = R_\sigma \cdot \sigma^C \quad [97]$$

$$\varepsilon^S = R_\varepsilon \cdot \varepsilon^C \quad [98]$$

Stellt man nun die Gleichungen [97] und [98] jeweils nach der Spannung und nach der Dehnung im Kristallkoordinatensystem um, so erhält man (De Wolf, 2015):

$$\sigma^C = R_\sigma^{-1} \cdot \sigma^S \quad [99]$$

$$\varepsilon^C = R_\varepsilon^{-1} \cdot \varepsilon^S \quad [100]$$

Wobei R_ε^{-1} auch geschrieben werden kann als R_σ^T und damit die obenstehenden Ausdrücke umformuliert werden können zu (De Wolf, 2015):

$$\sigma^C = R_\varepsilon^T \cdot \sigma^S \quad [101]$$

$$\varepsilon^C = R_\sigma^T \cdot \varepsilon^S \quad [102]$$

Setzt man nun die vorangegangenen Formeln in das Hook'sche Gesetz ein, ähnlich der Formel [31], so erhält man folgende Ausdrücke. Dabei werden nur die Indizes für das Probenkoordinatensystem angepasst:

$$\varepsilon^S = S_S \cdot \sigma^S \quad [103]$$

$$\varepsilon^S = R_\varepsilon \cdot \varepsilon^C \leftarrow \text{aus Formel [98]} \quad [104]$$

$$= R_\varepsilon \cdot S_C \cdot \sigma^C \leftarrow \text{mit } \varepsilon^C = S_C \cdot \sigma^C \text{ (Formel [31])} \quad [105]$$

$$R_\varepsilon \cdot S_C \cdot R_\varepsilon^T \cdot \sigma^S \leftarrow \text{mit } \sigma^C = R_\varepsilon^T \cdot \sigma^S \text{ (Formel [101])} \quad [106]$$

$$\frac{\varepsilon^S}{\sigma^S} = R_\varepsilon \cdot S_C \cdot R_\varepsilon^T = S_S \leftarrow \text{mit } S_S = \frac{\varepsilon_S}{\sigma_S} \text{ (Formel [103])} \quad [107]$$

Demnach gilt für die Nachgiebigkeit S_S im Probenkoordinatensystem (De Wolf, 2015):

$$S_S = R_\varepsilon \cdot S_C \cdot R_\varepsilon^T \quad [108]$$

Um aus der Gleichung [90] die Matrizen für R_σ und R_ε zu bestimmen, wendet man die Regeln aus Abbildung 8 an oder betrachtet die Matrizen für R in der Gleichung [94] für die Spannung beziehungsweise die Gleichung [95] für die Dehnung (De Wolf, 2015).

$$R_\sigma = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \quad [109]$$

$$R_\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \quad [110]$$

Als nächstes wird die transponierte Matrix von R_σ [98] und R_ε [99] bestimmt (Pufall, et al., 2012):

$$R_\sigma^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & 0 & -1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad [111]$$

$$R_\varepsilon^T = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad [112]$$

Anschließend bestimmt man die Nachgiebigkeit im Probenkoordinatensystem. Dazu verwendet man die Matrix für A_{Rot} [88], deren transponierte Matrix R_{Rot} [90] und die säkulare Gleichung für die Nachgiebigkeit des Kristallkoordinatensystems [29] ohne die Wellenlänge. Diese werden in die folgende Gleichung eingesetzt, welche aus Formel [108] abgeleitet wurde (Pufall, et al., 2012):

$$S_S = R_{Rot} \cdot S_C \cdot R_{Rot}^T = R_{Rot} \cdot S_C \cdot A_{Rot} \leftarrow \text{mit Hilfe von Formel [78]} \quad [113]$$

$$S_s^{sec} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(p+q)(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + q\varepsilon_{33} + 2r\varepsilon_{12} & \frac{2}{\sqrt{2}}r(\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) & \frac{1}{2}(p-q)(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \\ \frac{2}{\sqrt{2}}r(\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) & p\varepsilon_{33} + q(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) & \frac{2}{\sqrt{2}}r(\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) \\ \frac{1}{2}(p-q)(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) & \frac{2}{\sqrt{2}}r(\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) & \frac{1}{2}(p+q)(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + q\varepsilon_{33} - 2r\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad [114]$$

Alle Dehnungen in Gleichung [114] beziehen sich auf das Kristallkoordinatensystem. Um sie durch die Dehnungen im Probenkristallsystem zu ersetzen, benötigt man nun die Gleichung [108], in welche man die Gleichung [112] einsetzt. Dadurch erhält man folgenden Ausdruck (Pufall, et al., 2012) (De Wolf, 2015):

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^C \\ \varepsilon_{22}^C \\ \varepsilon_{33}^C \\ \varepsilon_{23}^C \\ \varepsilon_{31}^C \\ \varepsilon_{12}^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^S \\ \varepsilon_{22}^S \\ \varepsilon_{33}^S \\ \varepsilon_{23}^S \\ \varepsilon_{31}^S \\ \varepsilon_{12}^S \end{pmatrix} \quad [115]$$

Formuliert man diesen Tensor aus, so erhält man:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^C &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + 0 \cdot \varepsilon_{22}^S + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{33}^S + 0 \cdot \varepsilon_{23}^S + 1 \cdot \varepsilon_{31}^S + 0 \cdot \varepsilon_{12}^S \\ &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{33}^S + 1 \cdot \varepsilon_{31}^S = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \end{aligned} \quad [116]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{22}^C &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + 0 \cdot \varepsilon_{22}^S + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{33}^S + 0 \cdot \varepsilon_{23}^S + (-1) \cdot \varepsilon_{31}^S + 0 \cdot \varepsilon_{12}^S \\ &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{33}^S + (-1) \cdot \varepsilon_{31}^S = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S - 2\varepsilon_{31}^S) \end{aligned} \quad [117]$$

$$\varepsilon_{33}^C = 0 \cdot \varepsilon_{11}^S + 1 \cdot \varepsilon_{22}^S + 0 \cdot \varepsilon_{33}^S + 0 \cdot \varepsilon_{23}^S + 0 \cdot \varepsilon_{31}^S + 0 \cdot \varepsilon_{12}^S = 1 \cdot \varepsilon_{22}^S = \varepsilon_{22}^S \quad [118]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{23}^C &= 0 \cdot \varepsilon_{11}^S + 0 \cdot \varepsilon_{22}^S + 0 \cdot \varepsilon_{33}^S + \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{23}^S + 0 \cdot \varepsilon_{31}^S + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{12}^S \\ &= \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{23}^S + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{12}^S = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (\varepsilon_{12}^S - \varepsilon_{23}^S) \end{aligned} \quad [119]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{31}^C &= 0 \cdot \varepsilon_{11}^S + 0 \cdot \varepsilon_{22}^S + 0 \cdot \varepsilon_{33}^S + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{23}^S + 0 \cdot \varepsilon_{31}^S + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{12}^S \\ &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{23}^S + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \varepsilon_{12}^S = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (\varepsilon_{12}^S + \varepsilon_{23}^S) \end{aligned} \quad [120]$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12}^C &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + 0 \cdot \varepsilon_{22}^S + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \varepsilon_{33}^S + 0 \cdot \varepsilon_{23}^S + 0 \cdot \varepsilon_{31}^S + 0 \cdot \varepsilon_{12}^S \\ &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{11}^S + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \varepsilon_{33}^S = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S - \varepsilon_{33}^S) \end{aligned} \quad [121]$$

Durch das Einsetzen der Gleichungen [116] bis [121] in die Gleichung [114] erhält man die säkulare Matrix der Nachgiebigkeit im Probenkoordinatensystem, welche nur noch von den Dehnungen im selben Koordinatensystem abhängig ist.

$$\begin{aligned} S_{11}^S &= \frac{1}{2}(p+q)(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) + q\varepsilon_{33} + 2r\varepsilon_{12} \\ &= \frac{1}{2}(p+q) \left(\left(\frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S - 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right) + q(\varepsilon_{22}^S) + 2r \left(\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S - \varepsilon_{33}^S) \right) \\ &= \left(\frac{1}{2}(p+q) + r \right) \cdot \varepsilon_{11}^S + \left(\frac{1}{2}(p+q) - r \right) \cdot \varepsilon_{33}^S + q \cdot \varepsilon_{22}^S \end{aligned} \quad [122]$$

$$\begin{aligned} S_{12}^S &= \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot (\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) = \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S + \varepsilon_{23}^S) \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S - \varepsilon_{23}^S) \right) \right) \\ &= 2r \cdot \varepsilon_{12}^S \end{aligned} \quad [123]$$

$$\begin{aligned}
S_{13}^S &= \frac{1}{2}(p+q)(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \\
&= \frac{1}{2}(p+q) \left(\left(\frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S - 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right) = (p-q)\varepsilon_{31}^S
\end{aligned} \tag{124}$$

$$\begin{aligned}
S_{21}^S &= \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot (\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) = \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S + \varepsilon_{23}^S) \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S - \varepsilon_{23}^S) \right) \right) \\
&= 2r \cdot \varepsilon_{12}^S
\end{aligned} \tag{125}$$

$$\begin{aligned}
S_{22}^S &= p \cdot (\varepsilon_{33}) \cdot q \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \\
&= p \cdot (\varepsilon_{22}^S) + q \\
&\quad \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \right) + \left(\frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right) \\
&= p \cdot (\varepsilon_{22}^S) + q \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S)
\end{aligned} \tag{126}$$

$$\begin{aligned}
S_{23}^S &= \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot (\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) = \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S + \varepsilon_{23}^S) \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S - \varepsilon_{23}^S) \right) \right) \\
&= 2r \cdot \varepsilon_{12}^S
\end{aligned} \tag{127}$$

$$\begin{aligned}
S_{31}^S &= \frac{1}{2}(p+q)(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \\
&= \frac{1}{2}(p+q) \left(\left(\frac{1}{2}(\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S + 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{11}^S + \varepsilon_{33}^S - 2\varepsilon_{31}^S) \right) \right) = (p-q)\varepsilon_{31}^S
\end{aligned} \tag{128}$$

$$\begin{aligned}
S_{32}^S &= \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot (\varepsilon_{13} + \varepsilon_{23}) = \frac{2}{\sqrt{2}}r \cdot \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S + \varepsilon_{23}^S) \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(\varepsilon_{12}^S - \varepsilon_{23}^S) \right) \right) \\
&= 2r \cdot \varepsilon_{12}^S
\end{aligned} \tag{129}$$

Als nächstes wird der Krafttensor, ähnlich der Formel [17], durch Rotation in das Probenkoordinatensystem umgewandelt (De Wolf, et al., 1996) und (Anastassakis, 1990):

$$\begin{aligned}
 K'_{1111}^\varepsilon &= K'_{2222}^\varepsilon = p' \\
 K'_{3333}^\varepsilon &= p \\
 K'_{1122}^\varepsilon &= q' \\
 K'_{1133}^\varepsilon &= K'_{2233}^\varepsilon = q \\
 K'_{1212}^\varepsilon &= \frac{p-q}{2} \\
 K'_{1313}^\varepsilon &= K'_{2323}^\varepsilon = r
 \end{aligned} \tag{133}$$

Wobei gilt:

$$p' = \frac{p+q}{2} + r \text{ und } q' = \frac{p+q}{2} - r \tag{134}$$

Setzt man die Umformungen aus [133] in die Matrix des Kraft-Tensors aus [27] ein, so erhält man:

$$\begin{pmatrix} K_{11}^S \\ K_{22}^S \\ K_{33}^S \\ K_{23}^S \\ K_{31}^S \\ K_{12}^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{p+q}{2} + r & q & \frac{p+q}{2} - r & 0 & 0 & 0 \\ q & p & q & 0 & 0 & 0 \\ q \frac{p+q}{2} - r & q & \frac{p+q}{2} + r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{p-q}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^S \\ \varepsilon_{22}^S \\ \varepsilon_{33}^S \\ 2\varepsilon_{23}^S \\ 2\varepsilon_{31}^S \\ 2\varepsilon_{12}^S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ \omega_0^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{135}$$

Demnach ergibt sich für die Nachgiebigkeit der Schliffoberfläche (Pufall, et al., 2012) (De Wolf, 2015):

$$= \frac{1}{2\omega_0} \cdot (p \cdot S_{12} + q \cdot (S_{11} + S_{12}))(\sigma_{11}^S + \sigma_{11}^S) + (p \cdot S_{11} + 2q \cdot S_{12}) \cdot \sigma_{33}^S \quad [150]$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_3 &= \frac{1}{2\omega_0} \left(\frac{1}{2}(p+q) - r \right) \\ &\cdot \left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S + S_{12} \cdot \sigma_{33}^S \right. \\ &+ \left. \left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{22}^S \right) + \left(\frac{1}{2}(p+q) + r \right) \\ &\cdot \left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S + S_{12} \cdot \sigma_{33}^S \right. \\ &+ \left. \left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{22}^S \right) \\ &+ q(S_{12} \cdot \sigma_{11}^S + S_{11} \cdot \sigma_{33}^S + S_{12} \cdot \sigma_{33}^S) \end{aligned} \quad [151]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2\omega_0} \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(p+q)(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{2}r \cdot S_{44} + q \cdot S_{12} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right. \\ &+ \left. \left(\frac{1}{2}(p+q)(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{2}r \cdot S_{44} + q \cdot S_{12} \right) \cdot \sigma_{22}^S \right. \\ &+ \left. \left((p+q) \cdot S_{12} + q \cdot S_{11} \right) \cdot \sigma_{33}^S \right) \end{aligned} \quad [152]$$

In Abhängigkeit der Polarisationsrichtung des eingestrahnten beziehungsweise reflektierten Laserlichts kann nur eine der Gleichungen [148], [150] oder [152] der drei Eigenvektoren gültig sein. Für den angenommenen Fall, dass das Laserlicht sowohl in die Schliffebene eingestrahlt als auch von ihr reflektiert wird, befinden sich beide Eigenvektoren in der Ebene der Siliziumoberfläche ($[110]_C$ - $[001]_C$ -Ebene). Demnach gilt für beide Eigenvektoren (Pufall, et al., 2012):

$$e_C^i = (e_1^i \quad e_1^i \quad e_3^i) \quad [153]$$

$$e_c^S = (e_1^S \quad e_1^S \quad e_3^S) \quad [154]$$

Daraus folgt für die Matrix von Vektor f_c (Gleichung [64]) durch das Einsetzen der Formel [79] und der Formel [53], unter Berücksichtigung von Formel [153] und [154] (De Wolf, 2015):

$$\begin{aligned} f_c &= R_{ce} \cdot f_c = R_{ce} \cdot f_c = R_{xe} \cdot R_{ce} \cdot f_c = R_{Rot} \cdot f_c \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_{2c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} + e_{3c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} \\ e_{3c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} + e_{1c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} \\ e_{1c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{2c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (e_{2c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} + e_{3c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{3c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} + e_{1c}^{in} \cdot e_{3c}^{out}) \\ e_{1c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} + e_{2c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (e_{2c}^{in} \cdot e_{3c}^{out} + e_{3c}^{in} \cdot e_{2c}^{out} - e_{3c}^{in} \cdot e_{1c}^{out} - e_{1c}^{in} \cdot e_{3c}^{out}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad [155]$$

Es gibt insgesamt vier verschiedene Fälle, die beschreiben wie sich der Eigenvektor (Polarisation) des eingestrahnten Laserlichts und der Eigenvektor des reflektierten Laserlichts zueinander verhalten und welche experimentell zu beobachten sind. Der erste Fall beschreibt einen zur Siliziumoberfläche parallelen Eigenvektor des einfallenden Laserlichts (senkrecht auf der Schliffebene), also entlang $[100]_s$ - $[110]_c$ und einen senkrecht zur Siliziumoberfläche liegenden Eigenvektor des reflektierten Laserlichts und demnach parallel zur Schliffebene entlang $[010]_s$ - $[001]_c$. Im zweiten Fall sind sowohl der Eigenvektor des eingestrahnten als auch der Eigenvektor des reflektierten Laserlichts parallel zur Siliziumoberfläche ($[100]_s$ - $[001]_c$). Die dritte Möglichkeit beschreibt den Fall, dass der Eigenvektor des eingestrahnten Laserlichts senkrecht zur Siliziumoberfläche ist ($[010]_s$ - $[001]_c$) und zu einem parallel zur Siliziumoberfläche laufenden Eigenvektor ($[100]_s$ - $[001]_c$) reflektiert wird. Im letzten Fall sind sowohl der Eigenvektor des eingestrahnten Laserlichts als auch der Eigenvektor des reflektierten Laserlichts senkrecht (parallel zur Schliffebene) zur Siliziumoberfläche ($[010]_s$ - $[001]_c$) (Pufall, et al., 2012).

Die folgende Tabelle 3 zeigt nochmals übersichtlich die oben beschriebenen vier Fälle aus (Pufall, et al., 2012). Dabei bedeutet die Symbolkombination $\downarrow \mid$ oder $\uparrow \mid$, dass das Laserlicht

parallel zur Siliziumoberfläche polarisiert ist und die Symbolkombination $\downarrow-$ oder $\uparrow-$, dass das Laserlicht senkrecht zur Oberfläche polarisiert ist.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Möglichkeiten, wie die Eigenvektoren des eingestrahnten und des reflektierten Laserlichtes zueinander liegen können und die daraus resultierenden sichtbaren Raman-Peaks

	\mathbf{e}^{in}	\mathbf{e}^{out}	\mathbf{I}_1	\mathbf{I}_2	\mathbf{I}_3
1	$\downarrow \mid [110]_{\text{c}}$	$\uparrow- [001]_{\text{c}}$	d^2	0	0
2	$\downarrow \mid [110]_{\text{c}}$	$\uparrow \mid [110]_{\text{c}}$	0	d^2	0
3	$\downarrow- [001]_{\text{c}}$	$\uparrow \mid [110]_{\text{c}}$	d^2	0	0
4	$\downarrow- [001]_{\text{c}}$	$\uparrow- [001]_{\text{c}}$	0	0	0

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass unabhängig vom Experiment lediglich einer der ersten beiden Eigenvektoren (\mathbf{I}_1 oder \mathbf{I}_2) messbar ist. Das bedeutet, dass die Gleichung [148] für $\Delta\omega_1$ und die Gleichung [150] für $\Delta\omega_2$ für die Umrechnung der Peak-Verschiebung in die mechanische intrinsische Spannung verwendet werden kann. Für das hier verwendete Raman-Spektrometer, bei welchem der Laser vertikal polarisiert ist und demnach auch der reflektierte Laserstrahl vertikal polarisiert ist, gilt aus Tabelle 3 der zweite Fall. Demnach gilt für die Berechnung der triaxialen Spannung aus der Verschiebung des Siliziumpeaks der Zusammenhang:

$$\Delta\omega_2 = \frac{1}{2\omega_0} \cdot (p \cdot S_{12} + q \cdot (S_{11} + S_{12}))(\sigma_{11}^S + \sigma_{11}^S) + (p \cdot S_{11} + 2q \cdot S_{12}) \cdot \sigma_{33}^S \quad [156]$$

Die Gleichungen [148], [150] und [152] gelten für den Fall, dass eine triaxiale Spannung angenommen wird (Pufall, et al., 2012). Benötigt man die Abhängigkeiten der mechanischen Spannung von der Raman-Frequenzverschiebung für den uniaxialen Spannungsfall für die Messungen an einem Schliff, gelten auch hier die Annahmen aus dem ersten Abschnitt (Messung auf der Siliziumoberfläche). So gilt für den uniaxialen Spannungsfall die Formel [45] angewandt auf die Formel [138]:

$$\varepsilon_{23}^x = \varepsilon_{31}^x = \varepsilon_{12}^x = 0 \quad [161]$$

Setzt man nun die Dehnung der jeweiligen Achsrichtung in die Gleichungen [144] bis [145] für die Eigenwerte ein, ergeben sich daraus die Formeln für die Eigenwerte in Abhängigkeit der Spannungen wie folgt:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_1 = & \left(\frac{1}{2\omega_0} \left(\frac{1}{2}(p+q) + r \right) \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \right. \\ & + \left(\frac{1}{2}(p+q) - r \right) \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \\ & \left. + q(S_{12} \cdot \sigma_{11}^S) \right) \end{aligned} \quad [162]$$

$$= \frac{1}{2\omega_0} \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(p+q) \cdot (S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{2}r \cdot S_{44} + q \cdot S_{12} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \quad [163]$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_2 = & \frac{1}{2\omega_0} \left(p \cdot (S_{12} \cdot \sigma_{11}^S) + q \right. \\ & \cdot \left(\left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \right. \\ & \left. \left. + \left(\left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \right) \right) \end{aligned} \quad [164]$$

$$= \frac{1}{2\omega_0} \cdot \left(((p+q) \cdot S_{11} + q \cdot S_{12}) \cdot \sigma_{11}^S \right) \quad [165]$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega_3 = & \frac{1}{2\omega_0} \left(\left(\frac{1}{2}(p+q) - r \right) \cdot \left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) + \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \\ & + \left(\frac{1}{2}(p+q) + r \right) \cdot \left(\frac{1}{2}(S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{4}S_{44} \right) \cdot \sigma_{11}^S + q \\ & \cdot (S_{12} \cdot \sigma_{11}^S) \end{aligned} \quad [166]$$

$$= \frac{1}{2\omega_0} \cdot \left(\left(\frac{1}{2}(p+q) \cdot (S_{11} + S_{12}) - \frac{1}{2}r \cdot S_{44} + q \cdot S_{12} \right) \cdot \sigma_{11}^S \right) \quad [167]$$

Aus Tabelle 3 geht außerdem hervor, dass auch hier lediglich die Gleichungen [163] und [165] Geltung finden und messbar sind. Unter Berücksichtigung der Polarisationsrichtung des verwendeten Lasers gilt lediglich die Formel für $\Delta\omega_2$ (Formel [165]):

$$\Delta\omega_2 = \frac{1}{2\omega_0} \cdot \left(((p+q) \cdot S_{11} + q \cdot S_{12}) \sigma_{11}^S \right) \quad [168]$$

Wird die Formel [168] nach der Spannung umgestellt, so erhält man:

$$\sigma_{11}^S = \frac{\Delta\omega_2 \cdot 2\omega_0}{((p+q) \cdot S_{11} + q \cdot S_{12})} \quad [169]$$

Die in Gleichung [169] dargestellte Umrechnung von Peak-Verschiebung in die uniaxiale Spannung gilt nur für Raman-Messungen an angefertigten Schliften. Die Herleitung der biaxialen Spannung an einem angefertigten Schliff würde an dieser Stelle keinen Sinn machen, da man diese nicht mit der biaxialen Spannung an der Oberfläche gemessen mittels piezoresistiver Messung vergleichen kann. Hintergrund hierfür ist, dass die Y-Komponente dieser mechanischen Spannung an der Chipoberfläche der Z-Komponente bei Spannungsmessungen an einem Schliff entspricht. Diese Spannungskomponente zeigt aus der Ebene heraus und ist mit der gegebenen Raman-Messanordnung nicht bestimmbar.

Die Spannungen gemessen auf der Chipoberfläche sind am ehesten noch vergleichbar mit der in Gleichung [169] hergeleiteten Abhängigkeit für die uniaxiale Spannung.

Für die Einheiten der jeweiligen Konstanten aus (Pufall, et al., 2012) wurden die ursprünglichen Einheiten aus (Anastassakis, et al., 1970) und (Chandrasekhar, et al., 1978) verwendet. Da teilweise schon sehr veraltete Einheiten wie zum Beispiel Dyn/cm² benutzt wurden, wurden diese in aktuelle SI-Einheiten umgerechnet.

$$p = -1,43 \cdot (\omega_0)^2 \text{ (Chandrasekhar, et al., 1978)} \quad [170]$$

$$q = -1,89 \cdot (\omega_0)^2 \text{ (Chandrasekhar, et al., 1978)} \quad [171]$$

Die Einheiten für die Koeffizienten p und q ergeben sich aus der Einheit für die Wellenzahl $(\omega_0)^2$ mit [cm⁻²].

$$\omega_0 = 520,6 \text{ cm}^{-1} \quad [172]$$

$$S_{11} = 76,8 \cdot 10^{-14} \frac{\text{cm}^2}{\text{Dyn}} \quad [173]$$

(Anastassakis, et al., 1970)

$$[S_{11}] = 1 \frac{\text{cm}^2}{\text{Dyn}} \quad [174]$$

$$\rightarrow 1\text{Pa} = 10 \frac{\text{Dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$\rightarrow 1\text{Pa}^{-1} = 10 \frac{\text{cm}^2}{\text{Dyn}} \quad [175]$$

$$\rightarrow S_{11} = 7,68 \cdot 10^{-13} \frac{cm^2}{Dyn} \quad [176]$$

$$\rightarrow S_{11} = 7,68 \cdot 10^{-12} Pa^{-1} \text{ analog für } S_{12} \quad [177]$$

$$S_{12} = -21,4 \cdot 10^{-14} \frac{cm^2}{Dyn} \quad [178]$$

(Anastassakis, et al., 1970)

$$\rightarrow S_{12} = -2,14 \cdot 10^{-12} Pa^{-1} \quad [179]$$

Nachdem die Einheiten der einzelnen Konstanten aus (Pufall, et al., 2012) bestimmt und hergeleitet wurden, soll nun die Einheitenprobe am Beispiel der Summenspannung durchgeführt werden. Dabei werden die Einheiten in die Gleichung [85] eingesetzt.

$$\begin{aligned} & [(\sigma_{11} + \sigma_{22})] \\ &= \frac{[cm^{-1}] \cdot [cm^{-1}]}{((([cm^{-1}])^2) \cdot ([Pa^{-1}])) + ((([cm^{-1}])^2) + (([cm^{-1}])^2)) \cdot ([Pa^{-1}])} \end{aligned} \quad [180]$$

$$[(\sigma_{11} + \sigma_{22})] = \frac{[cm^{-2}]}{([cm^{-2}] \cdot [Pa^{-1}]) + ([cm^{-2}]) + ([cm^{-2}] \cdot [Pa^{-1}])} \quad [181]$$

$$[(\sigma_{11} + \sigma_{22})] = \frac{[cm^{-2}]}{([cm^{-2}]) \cdot (([Pa^{-1}]) + (1) + ([Pa^{-1}]))} \quad [182]$$

$$[(\sigma_{11} + \sigma_{22})] = \frac{1}{([Pa^{-1}] + [Pa^{-1}])} \quad [183]$$

$$[(\sigma_{11} + \sigma_{22})] = Pa \quad [184]$$

2.3. Der Spannungsmesschip basierend auf dem piezo-resistiven Effekt

Der Spannungsmesschip als gewählter Modellchip bringt einige Vorteile mit sich. Der Hauptgrund für die Wahl dieses Chips als Modellchip, ist die Möglichkeit die laterale mechanische Spannung auf der Chipoberfläche selbst im vergossenen Zustand (Mold Compound) zu bestimmen (Kittel, et al., 2008). Dadurch war es erst möglich, die verschiedenen Verfahren zur Dekapsulierung und deren Einfluss auf die intrinsische mechanische Spannung im Chip zu charakterisieren. Speziell bei dem hier verwendeten Spannungsmesschip war es möglich, die mechanische Spannung an 60 definierten Positionen durch das Messen von Strömen und elektrischen Spannungen zu berechnen. Der Chip kann über vier Kontaktflächen auf der einen Seite oder den vier Kontaktflächen auf der anderen Chipseite ausgelesen werden. Dabei sind die Kontaktflächen an den Seiten spiegelverkehrt angeordnet (Abbildung 9). Die Strommessspiegel besitzen eine Abmessung von $50\ \mu\text{m}$ auf $50\ \mu\text{m}$ und zwischen den Strommessspiegeln beträgt der Abstand $260\ \mu\text{m}$ (Kittel, et al., 2008).

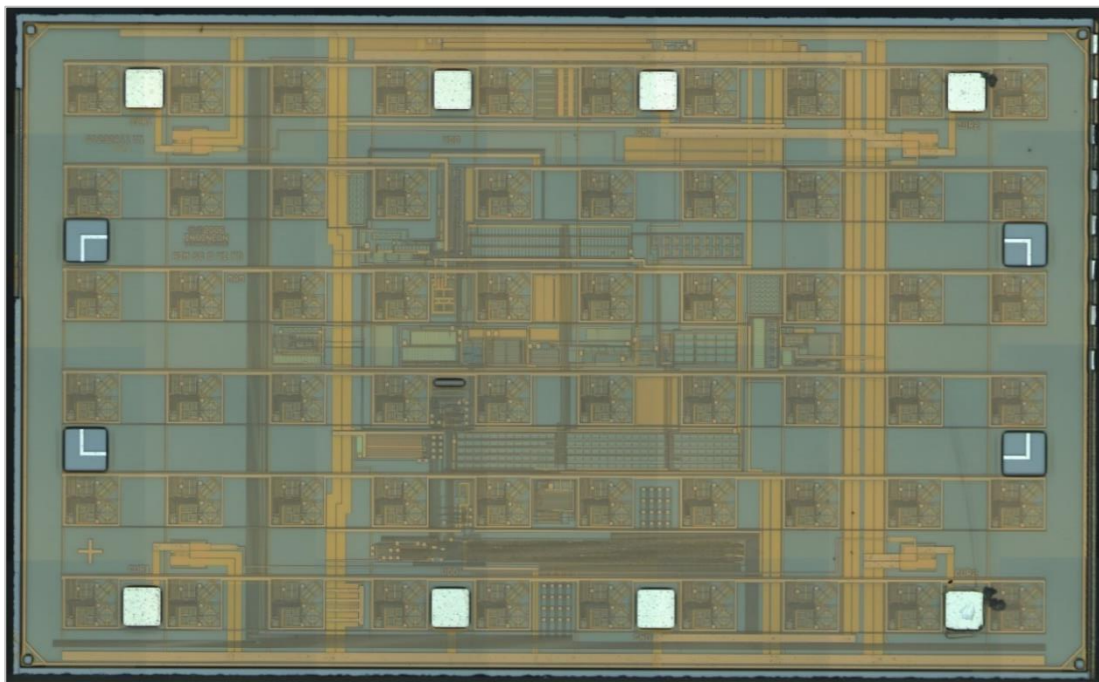


Abbildung 9: Mikroskopaufnahme des verwendeten Spannungsmesschips V1s

Das automatische Auslesen der einzelnen Strommessspiegel erfolgt über eine interne Logikschaltung. Die Logik selbst sorgt dafür, dass pro Strommessspiegel 17 nacheinander ablaufenden Messungen automatisch durchgeführt werden (Kittel, et al., 2008). Die ersten vier Messungen sind dazu da, die nMOS-Transistoren (n-Kanal Metalloxid Feldeffekt Transistoren) und pMOS-Transistoren (p-Kanal Metalloxid Feldeffekt Transistoren) zu messen. Dabei

werden die jeweiligen Transistoren zweimal gemessen und aus den Ergebnissen der Mittelwert gebildet, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Zunächst wird eine Stromstärke an den Transistor angelegt und die elektrische Spannung gemessen, um dann im nächsten Schritt diese Stromstärke über einen internen Schalter an das Gate anzulegen und dann die elektrische Spannung noch einmal zu messen (Schubert, 2008). In den letzten acht Messschritten wird die Identität jedes Strommessspiegels bestimmt und überprüft (Kittel, et al., 2008). Das automatische Schalten der einzelnen Messungen innerhalb der Logik wird mit Hilfe verschiedener Potenziale der Versorgungsspannung realisiert. Dabei wechselt die Logik bei jeder fallenden Flanke zur nächsten Messung. Nach der 17. Messung wird ein Low-Potenzial angelegt, welches dafür sorgt, dass zum nächsten Strommessspiegel geschaltet wird. Zu Beginn jeder Messung werden zunächst Null Volt angelegt, um den Spannungsmesschip zurückzusetzen (Schubert, 2008).

Ein Strommessspiegel besteht dabei aus vier Transistorzellen. In zwei der vier Transistorzellen sind die Transistoren im 45° -Winkel angeordnet, in der dritten Transistorzelle im 90° -Winkel und in der vierten Messzelle parallel zueinander (Abbildung 10). Die Transistorzellen sind so angeordnet, dass jeweils ein Transistortyp sensitiv für die jeweilige Kristallrichtung des Siliziumkristalls ist. Der nMOS-Transistor entspricht den Kristallrichtungen [010] und [100] und der pMOS-Transistor den Kristallrichtungen [110] und [-110] (Abbildung 11). Die Transistorzellen (nMOS-Transistoren) auf der rechten Seite in Abbildung 10, welche im 45° -Winkel zueinander angeordnet sind, dienen zur Bestimmung der Genauigkeit der Spannungsmessung. Dabei werden die Ergebnisse der Messungen der jeweils vier Transistoren miteinander verglichen. Ist die Abweichung der vier Messungen größer als 1 %, sollte die Messung nicht verwendet werden (Schubert, 2008).

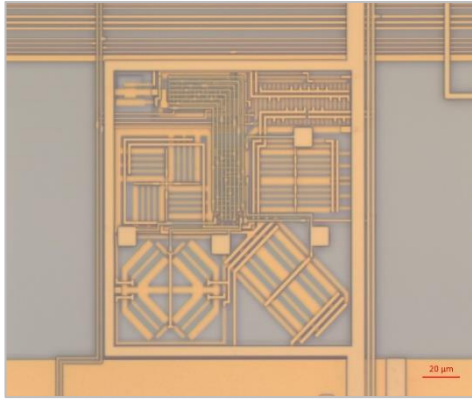


Abbildung 10: Detail-Aufnahme eines Strommessspiegels vom Spannungsmesschip

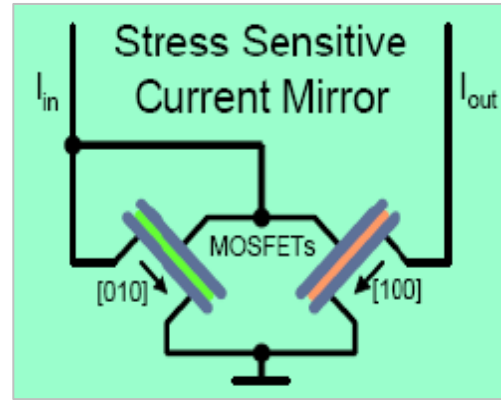


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anordnung der Strommessspiegel (90°) (Kittel, et al., 2008)

Die vier n-MOS-Transistoren aus der unteren linken Zelle dienen, aufgrund des 45°-Winkels zu den Chipkanten, zur Bestimmung der Scherspannung. Im Gegensatz dazu sind die vier pMOS-Transistoren in der Zelle oben rechts, durch ihre Ausrichtung parallel zu den Chipkanten, dafür gedacht die mechanischen Spannungen in X- und in Y-Richtung zu bestimmen.

Da in den jeweiligen Transistorzellen der linken Seite, die gegenüberliegenden gleich ausgerichteten Transistoren elektrisch zusammengeschaltet sind, liegt der Messpunkt der mechanischen Spannung genau in der Mitte der jeweiligen Transistorzelle der linken Seite (Schubert, 2008).

Die Berechnung der mechanischen Spannung aus der gemessenen Stromstärke und der elektrischen Spannung basiert auf dem piezo-resistiven Effekt. Dieser beschreibt die Widerstandsänderung des spezifischen Widerstands durch die Veränderung der Ladungsträgerbeweglichkeit in Folge des Einbringens mechanischer Spannungen in das System (Schubert, 2008) (Kittel, et al., 2008). Für die Herleitung wird zunächst angenommen, dass sich die Transistorstromstärke in Betriebsbereichen der starken Inversion, sowohl im linearen als auch im gesättigten Bereich arbeitet. Dabei lässt sich die Stromstärke aus dem resistiven Teil der Kanalwiderstände bestimmen (Jaeger, et al., 1995) (Kittel, et al., 2008). Unter Inversion versteht man, dass die Ladungsträgerdichte der Elektronen im Kanal genauso groß ist wie die Ladungsträgerdichte der Defektelektronen (Löcher) im Substrat außerhalb der Raumladungszone (Klar, et al., 2015). Die piezo-resistive Antwort des Feldeffekttransistors in dem oben beschriebenen Betriebsbereich ähnelt der piezo-resistiven Antwort eines Widerstandes. Daher wird der Transistor für die Herleitung der mechanischen Spannung in

Abhängigkeit von der elektrischen Spannung beziehungsweise Stromstärke als einfacher Widerstand gesehen.

Für einen Widerstand, welcher sich in einem Winkel θ , bezogen auf die Kristallorientierung [100] auf einem Siliziumwafer, befindet, auf den eine beliebige mechanische Spannung σ wirkt und der einer Temperatur T ausgesetzt ist, gilt (Jaeger, et al., 1995):

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad [185]$$

$$\begin{aligned} R(\sigma, T) &= R(0,0) \\ &\cdot \left(1 + (\pi_{11} \cdot \sigma_{11} + \pi_{12} \cdot (\sigma_{22} + \sigma_{33})) \right. \\ &\cdot \cos^2 \theta (\pi_{11} \cdot \sigma_{22} + \pi_{12} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{33})) \cdot \sin^2 \theta + 2\pi_{44} \cdot \sigma_{12} \\ &\cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot T + \dots \left. \right) \end{aligned} \quad [186]$$

Dabei sind π_{11} , π_{12} und π_{44} die drei unabhängigen piezo-resistiven Koeffizienten von Silizium. Die Temperatur T setzt sich hierbei zusammen aus der Anfangstemperatur T_0 und der Temperatur während der Messung T_m . Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der Einfluss der Temperaturänderung auf den Widerstand sehr klein ist und somit der Temperaturkoeffizient α vernachlässigt werden kann (Jaeger, et al., 1995). Damit vereinfacht sich die Gleichung [186] folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= (\pi_{11} \cdot \cos^2 \theta + \pi_{12} \cdot \sin^2 \theta) \sigma_{11} + (\pi_{11} \cdot \sin^2 \theta + \pi_{12} \cdot \cos^2 \theta) \sigma_{22} \\ &\quad + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sin 2\theta \cdot \sigma_{12} \end{aligned} \quad [187]$$

Wobei gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R(\sigma, T) - R(0,0)}{R(0,0)} \quad [188]$$

Da die gängigsten Orientierungen der Widerstände auf Silizium Vielfache von π sind ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ oder 135°) und sich demnach in einem Winkel $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ und 180° hinsichtlich der $[110]$ -Achse befinden, ist es möglich die trigonometrischen Funktionen aus [187] zu vereinfachen.

Tabelle 4: Berechnung der Winkelfunktionen aus der Formel [201] für bestimmte Winkel

	45°	90°	135°	180°
$\sin^2 \theta$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	0
$\cos^2 \theta$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	1
$\sin 2\theta$	1	0	-1	0

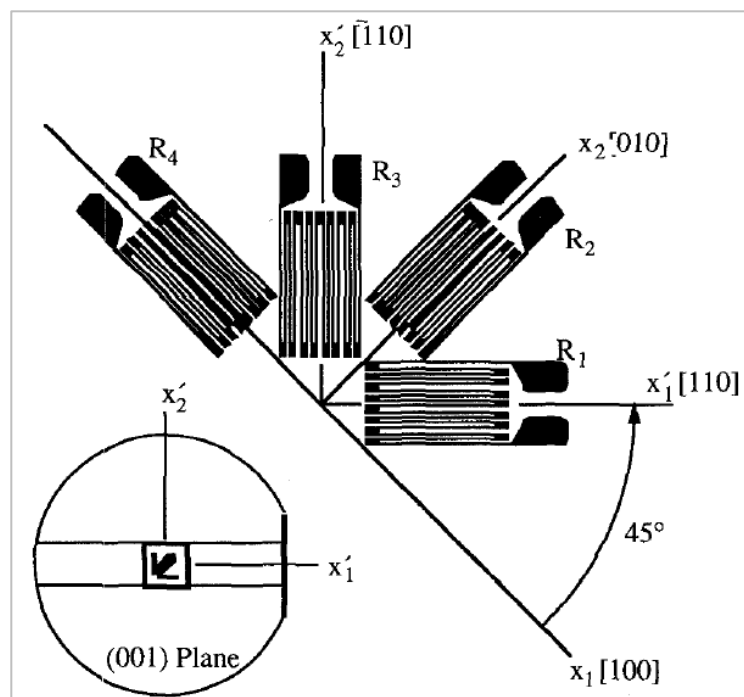


Abbildung 12: Darstellung der möglichen Ausrichtungen der Widerstände (Jaeger, et al., 1995)

Für Widerstände der jeweiligen Richtung, wie in Abbildung 12 aus (Jaeger, et al., 1995) zu sehen ist, gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_1}{R_1} &= (\pi_{11} \cdot \cos^2(45^\circ) + \pi_{12} \cdot \sin^2(45^\circ))\sigma_{11} \\ &+ (\pi_{11} \cdot \sin^2(45^\circ) + \pi_{12} \cdot \cos^2(45^\circ))\sigma_{22} + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \\ &\cdot \sin 2(45^\circ) \cdot \sigma_{12} \end{aligned} \quad [189]$$

→ für $\theta = 45^\circ$ entspricht der Kristallorientierung [110]

$$= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \quad \rightarrow \text{mit } \pi_{11} + \pi_{12} = \pi_S$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_2}{R_2} &= (\pi_{11} \cdot \cos^2(90^\circ) + \pi_{12} \cdot \sin^2(90^\circ))\sigma_{11} \\ &+ (\pi_{11} \cdot \sin^2(90^\circ) + \pi_{12} \cdot \cos^2 \theta(90^\circ))\sigma_{22} + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \\ &\cdot \sin 2(90^\circ) \cdot \sigma_{12} \end{aligned} \quad [190]$$

→ für $\theta = 90^\circ$ (entspricht der Kristallorientierung [010])

$$= \sigma_{11} \cdot \pi_{12} + \sigma_{22} \cdot \pi_{11} + \sigma_{33} \cdot \pi_{12}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_3}{R_3} &= (\pi_{11} \cdot \cos^2(135^\circ) + \pi_{12} \cdot \sin^2(135^\circ))\sigma_{11} \\ &+ (\pi_{11} \cdot \sin^2 \theta(135^\circ) + \pi_{12} \cdot \cos^2 \theta(135^\circ))\sigma_{22} + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} \\ &+ \pi_{44} \cdot \sin 2(135^\circ) \cdot \sigma_{12} \end{aligned} \quad [191]$$

→ für $\theta = 135^\circ$ (entspricht der Kristallorientierung $[\bar{1}10]$)

$$= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} - \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \quad \rightarrow \text{mit } \pi_{11} + \pi_{12} = \pi_S$$

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta R_4}{R_4} &= (\pi_{11} \cdot \cos^2(180^\circ) + \pi_{12} \cdot \sin^2(180^\circ))\sigma_{11} \\
&+ (\pi_{11} \cdot \sin^2(180^\circ) + \pi_{12} \cdot \cos^2(180^\circ))\sigma_{22} + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \\
&\cdot \sin 2(180^\circ) \cdot \sigma_{12}
\end{aligned} \tag{192}$$

→ für $\theta = 180^\circ$ (entspricht der Kristallorientierung [100])

$$= \sigma_{11} \cdot \pi_{11} + \sigma_{22} \cdot \pi_{12} + \sigma_{33} \cdot \pi_{12}$$

Wendet man nun die Formeln für die Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der mechanischen Spannung (Gleichungen [189] bis [192]) auf den Feldeffekttransistor an, ist zunächst ein Blick auf die Formeln für den linearen und den gesättigten Bereich des Transistors notwendig. Der Driftstrom (I_D) ergibt sich wie folgt (Klar, et al., 2015):

$$I_D \cdot \int_{y=0}^{y=L} dy = \mu \cdot W \cdot C_{OX} \cdot \int_{\varphi_K}^{\varphi_K=U_{DS}} (U_{GS} - U_T - \varphi_K) \cdot d\varphi_K \tag{193}$$

$$I_D = \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left((U_{GS} - U_T) \cdot U_{DS} - \frac{(U_{DS})^2}{2} \right) \tag{194}$$

Demnach ist der Driftstrom abhängig von der Beweglichkeit der Elektronen (μ), der Oxidkapazität (C_{OX}), der Länge (L) und der Weite (W) des Transistors, der Gate-Source-Spannung (U_{GS}), der Einsatzspannung (U_T) und von der Drain-Source-Spannung (U_{DS}). Wirkt nun eine mechanische Spannung auf einen Transistor, kann sich der Driftstrom durch eine Änderung der Größe des Transistors (W und L), durch eine Änderung der Ladungsträgermobilität (μ) oder durch eine Änderung der Einsatzspannung verschieben (Jaeger, et al., 1995).

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} = \frac{\Delta \mu}{\mu} - \frac{\Delta U_T}{U_T} \cdot \left(\frac{2 \cdot U_T}{U_{GS} - U_T} \right) \tag{195}$$

Die Änderung der Ladungsträgermobilität kann über die allgemeine Formel des Widerstands beschrieben werden (Klar, et al., 2015), (Jaeger, et al., 1995):

$$R = \frac{\rho \cdot L}{W \cdot d} \quad [196]$$

Dabei ist ρ der spezifische Widerstand, d die Dicke des Widerstandes. W und L sind die Weite und die Länge des Transistors. Zusätzlich muss dabei berücksichtigt werden, dass es sich hierbei um einen Schichtwiderstand handelt und nicht um einen reinen Widerstand. Der Schichtwiderstand in einem Halbleiter ergibt sich wie folgt (Sze, et al., 2007), (Reisch, 2007):

$$\rho = \frac{1}{e \cdot \mu \cdot N_A} \quad [197]$$

In dieser Formel ist e die Elementarladung, μ die Mobilität der Defektelektronen (Löcher) und N_A die Akzeptor-Konzentration. Demnach ergibt sich für die Gleichung [196] (Jaeger, et al., 1995):

$$R = \frac{1}{e \cdot \mu \cdot N_A} \cdot \frac{L}{W \cdot d} \quad [198]$$

Wie bereits aus Formel [194] geschlussfolgert wurde, beeinflusst die mechanische Spannung die Dimensionen des Transistors. Da diese in Formel [198] sowohl im Zähler als auch im Nenner stehen, ist der Einfluss dieser Größen allerdings vernachlässigbar. Demnach ändert sich der Schichtwiderstand hauptsächlich durch die Änderung der Mobilität der Defektelektronen in Folge der durch die mechanische Spannung auftretenden Biegung der Energiebanden im Silizium und der daraus resultierenden Verschiebung des Fermi-Niveaus (Mikoshiha, 1981), (Jaeger, et al., 1995).

Daraus ergibt sich für die Formel [199] folgender Zusammenhang (Jaeger, et al., 1995):

$$\frac{\Delta I}{I} \cong \frac{\Delta \mu}{\mu} = -\frac{\Delta R}{R} \quad [199]$$

In dem verwendeten Spannungsmesschip sind die n-MOSFETs im 45°-Winkel angeordnet. Der Grund dafür ist, dass bei dieser Orientierung die Transistoren eine besonders hohe Sensitivität für die mechanische Spannung entlang der Kristallorientierung besitzen (Jaeger, et al., 1995). Demnach sind die Transistoren im verwendeten Spannungsmesschip entlang der [100]- oder [010]-Richtung orientiert. Unter Berücksichtigung von Formel [199] ergeben sich nun für die Formeln [190] und [192] folgende Abhängigkeiten (Jaeger, et al., 1995):

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} [100] = -\sigma_{11} \cdot \pi_{11} - \sigma_{22} \cdot \pi_{12} - \sigma_{33} \cdot \pi_{12} \quad [200]$$

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} [010] = -\sigma_{11} \cdot \pi_{12} - \sigma_{22} \cdot \pi_{11} - \sigma_{33} \cdot \pi_{12} \quad [201]$$

Durch die Subtraktion der Gleichungen [200] und [201] ergibt sich das Verhältnis des Drain-Stroms für den n-MOSFET (Schubert, 2008) :

$$\frac{\Delta I}{I} = 2 \cdot \frac{I_{[100]} - I_{[010]}}{I_{[100]} + I_{[010]}} [n - MOSFET] = (-(\pi_{11} - \pi_{12}))(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \quad [202]$$

Aus der Formel [202] ist zu erkennen, dass die n-MOSFETS für die Detektion der Scherspannung verwendet werden, da die Empfindlichkeit (π_{11} und π_{22}) der mechanischen Spannung hier viel größer ist (Kittel, et al., 2008). Im Gegensatz dazu besitzen die p-MOSFETS eine hohe Empfindlichkeit π_{44} für mechanische Spannungen, wenn sie entlang der

Kristallrichtungen $[\bar{1}10]$ oder $[110]$ ausgerichtet sind (Jaeger, et al., 1995). Die Sensitivität des jeweiligen Transistortyps geht auch aus den vergleichsweise hohen Werten für π_{11} , π_{22} bei n-dotiertem Silizium (n-MOSFET) und π_{44} bei p-dotiertem Silizium (p-MOSFET) aus der Tabelle 5 hervor (Jaeger, et al., 1995).

Tabelle 5: Typische Werte für piezo-resistive Koeffizienten für leicht dotiertes Silizium

Piezo-resistive coefficient	n-Type silicon [10^{12} Pa^{-1}]	p-Type silicon [10^{12} Pa^{-1}]
π_{11}	-1022	66
π_{22}	534	-11
π_{44}	-136	1381
$\pi_s = \pi_{11} + \pi_{22}$	-488	55
$\pi_D = \pi_{11} - \pi_{22}$	-1556	77

Aus diesem Grund sind die p-MOS Transistoren, wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, auf dem Spannungsmesschip parallel zu den Außenkanten des Chips angeordnet (Schubert, 2008) und dienen zur Detektion der mechanischen Spannungen in der Ebene (Kittel, et al., 2008). Deshalb kommen nur die beiden Gleichungen [189] und [191] für die Darstellung der Änderung der Stromstärke in Abhängigkeit der mechanischen Spannung in Frage. Berücksichtigt man zusätzlich den Zusammenhang aus Gleichung [213] ergeben sich folgende Formeln für die pMOSFETs (Schubert, 2008):

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} [110] = \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \quad [203]$$

$$\frac{\Delta I_D}{I_D} [\bar{1}10] = \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{12} \cdot \sigma_{33} - \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \quad [204]$$

Subtrahiert man nun die Gleichungen, um das Verhältnis der Drain-Stromes zu erhalten, so folgt (Schubert, 2008):

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta I}{I} &= 2 \cdot \frac{I_{[110]} - I_{[\bar{1}\bar{1}0]}}{I_{[110]} + I_{[\bar{1}\bar{1}0]}} [p - MOSFET] \\
&= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \\
&\quad - \left(\frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} - \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \right) \quad [205] \\
&= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} - \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\
&\quad - \pi_{11} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} = 2 \cdot \pi_{44} \cdot \sigma_{12}
\end{aligned}$$

Die X-Achse des Spannungsmesschips ist entlang der $[\bar{1}\bar{1}0]$ - Richtung und die Y-Achse entlang der $[\bar{1}\bar{1}0]$ -Richtung (Kittel, et al., 2008) orientiert. Demnach ist das Koordinatensystem des Spannungsmesschips, bezogen auf das hier und in (Jaeger, et al., 1995) angenommene Koordinatensystem, um 135° ($\frac{3}{4}\pi$) gedreht (Schubert, 2008). Es muss demnach eine Koordinatentransformation durchgeführt werden, um die Gleichungen für die mechanische Spannung, bezogen auf das Koordinatensystem des Chips, herzuleiten. Für die Koordinatentransformation werden die Gleichungen aus (Gross, et al., 2017) verwendet:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot \cos 2\theta + \sigma_{12} \cdot \sin 2\theta \\
&= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot \cos 2(135^\circ) + \sigma_{12} \cdot \sin 2(135^\circ) \\
&\rightarrow \sin 2\theta \text{ für } \theta = 135^\circ \rightarrow \sin 2(135^\circ) = -1 \rightarrow \text{siehe Tabelle 4} \quad [206] \\
&\rightarrow \cos 2\theta = 1 - 2 \cdot \sin^2 \theta \text{ für } \theta = 135^\circ \text{ mit Hilfe von Tabelle 4} \\
\cos 2(135^\circ) &= 1 - 2 \cdot \sin^2(135^\circ) = 1 - 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) = 1 - 1 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot (0) + \sigma_{12} \cdot (-1) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \sigma_{12}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{yy} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot \cos 2\theta - \sigma_{12} \cdot \sin 2\theta \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot (0) - \sigma_{12} \cdot (-1) \quad [207] \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \sigma_{12}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xy} &= -\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot \sin 2\theta + \sigma_{12} \cdot \cos 2\theta \\ &= -\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot (-1) + \sigma_{12} \cdot (0) \quad [208] \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22})\end{aligned}$$

Bestimmt man die Gleichungen für die Summe und die Differenz der Normalspannungen σ_{11} und σ_{22} gemäß (Kittel, et al., 2008) und (Schubert, 2008), so erhält man:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} - \sigma_{yy} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \sigma_{12} - \left(\frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \sigma_{12} \right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \sigma_{12} - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \sigma_{12} \quad [209] \\ &= -2 \cdot \sigma_{12}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} + \sigma_{yy} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \sigma_{12} + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \sigma_{12} \\
&= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\
&= \sigma_{11} + \sigma_{22}
\end{aligned}
\tag{210}$$

Setzt man als nächstes in die Gleichungen [208] bis [210] die Gleichung [202] beziehungsweise [205] ein, so erhält man die Gleichungen für die Scherspannung, die Differenz der Normalspannung und die Summe der Normalspannung in Abhängigkeit der Drain-Ströme (Kittel, et al., 2008), (Schubert, 2008):

$$\begin{aligned}
\sigma_{xy} &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\
&= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-1}{\pi_{11} - \pi_{12}} \cdot \frac{2 \cdot I_{[100]} - I_{[010]}}{I_{[100]} + I_{[010]}} \right) = \frac{-1}{\pi_{11} - \pi_{12}} \cdot \frac{I_{[100]} - I_{[010]}}{I_{[100]} + I_{[010]}}
\end{aligned}
\tag{211}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} - \sigma_{yy} &= -2 \cdot \sigma_{12} \\
&= -2 \cdot \left(\frac{1}{\pi_{44}} \cdot \frac{I_{[110]} - I_{[\bar{1}10]}}{I_{[110]} + I_{[\bar{1}10]}} \right) = \frac{-2}{\pi_{44}} \cdot \frac{I_{[110]} - I_{[\bar{1}10]}}{I_{[110]} + I_{[\bar{1}10]}}
\end{aligned}
\tag{212}$$

Aufgrund des in (Kittel, et al., 2008) und (Schubert, 2008) angenommenen Koordinatensystems (Abbildung 13) für die Anordnung des Strommessspiegels, welche durch die höhere Sensitivität der mechanischen Spannung entlang der jeweiligen Kristallorientierungen begründet ist, muss das Vorzeichen für die Formel [212] umgedreht werden.

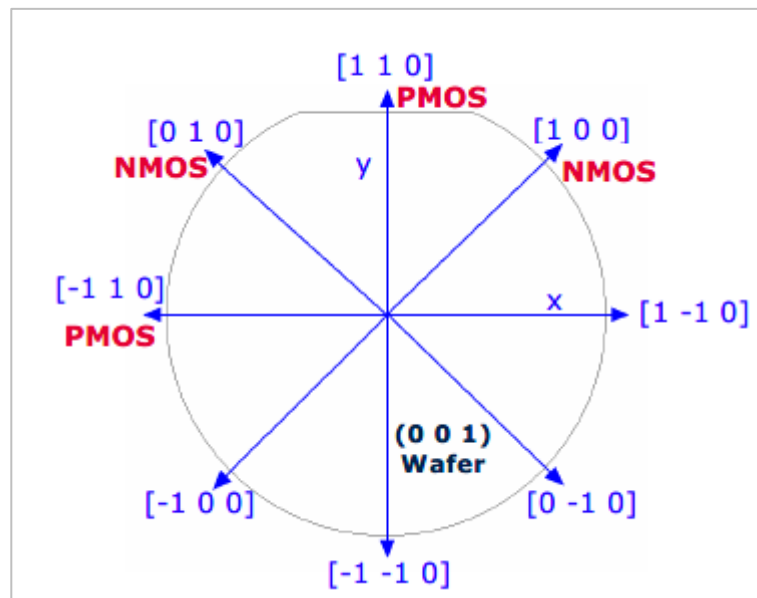


Abbildung 13: Darstellung der Ausrichtung des Strommessspiegels für die einzelnen Kristallorientierungen (Schubert, 2008)

Dadurch ergibt sich (Kittel, et al., 2008), (Schubert, 2008):

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \frac{2}{\pi_{44}} \cdot \frac{I_{[110]} - I_{[\bar{1}10]}}{I_{[110]} + I_{[\bar{1}10]}} \quad [213]$$

Für die Summe der Normalspannungen müssen die Gleichungen [203] und [204] zunächst addiert werden (Schubert, 2008), (Kittel, et al., 2008):

$$\begin{aligned}
& \frac{\Delta I_D}{I_D} [110] + \frac{\Delta I_D}{I_D} [\bar{1}10] \\
&= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} + \pi_{44} \cdot \sigma_{12} + \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\
&+ \pi_{11} \cdot \sigma_{33} - \pi_{44} \cdot \sigma_{12} \tag{214} \\
&= \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} + \frac{\pi_S}{2} \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \pi_{11} \cdot \sigma_{33} \\
&= \pi_S \cdot (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + 2 \cdot \pi_{11} \cdot \sigma_{33}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sigma_{xx} + \sigma_{yy} = (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\
&= \frac{2}{\pi_{11} + \pi_{12}} \cdot \left(1 - \frac{I_{[ein]}^{S_2} + I_{[aus]}^{S_2}}{I_{[ein]}^{S_1} + I_{[aus]}^{S_1}} - \pi_{11} \cdot \sigma_{33} \right) \tag{215}
\end{aligned}$$

Die einzelnen Spannungstensoren für die X- und die Y-Richtung lassen sich bei bekannter Summe ($\sigma_{11} + \sigma_{22}$) und Differenz ($\sigma_{11} - \sigma_{22}$) der Normalspannung wie folgt bestimmen (Kittel, et al., 2008), (Schubert, 2008):

$$\sigma_{SUM} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \tag{216}$$

$$\sigma_{SUM} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \tag{217}$$

$$\sigma_{SUM} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}$$

$$\sigma_{DIFF} + \sigma_{yy} = \sigma_{xx}$$

$$\sigma_{SUM} = \sigma_{DIFF} + 2 \cdot \sigma_{yy} \tag{218}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{(\sigma_{SUM} - \sigma_{DIFF})}{2}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{SUM} &= \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \\
\sigma_{DIFF} - \sigma_{xx} &= -\sigma_{yy} \\
-\sigma_{DIFF} + \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} \\
\sigma_{SUM} &= -\sigma_{DIFF} + 2 \cdot \sigma_{xx} \\
\sigma_{xx} &= \frac{(\sigma_{SUM} + \sigma_{DIFF})}{2}
\end{aligned}
\tag{219}$$

Anhand der Gleichungen [218] und [219] ist es nun möglich, die mechanischen Spannungstensoren σ_{xx} und σ_{yy} auf der Chipoberfläche direkt mittels piezo-resistiver Messung zu bestimmen.

2.4. Die Finite Elemente Simulation

2.4.1. Finite Elemente Methode (FEM)

Die Finite Elemente Methode entstand Anfang der 1950er Jahre und wurde seitdem dank steigender Rechnerkapazitäten von einfachen Beispielen zu komplexen Lösungen weiterentwickelt. Heute ist die Finite Elemente Methode ein mächtiges Werkzeug, welches aus den Bereichen der Forschung und Entwicklung nicht mehr weg zu denken ist (Merkel, et al., 2014).

Grundlage einer jeden Simulation ist ein physikalisches oder technisches Problem, welches vollständig durch die Geometrie, Feldgleichung im Gebiet, die Randbedingungen und durch die Anfangsbedingungen bei zeitabhängigen Problemen definiert ist (Merkel, et al., 2014). Diese vier Dinge bilden das vereinfachte Modell zur leichteren Lösbarkeit der Fragestellung. Die Übertragbarkeit des Modells und damit der Ergebnisse in die Realität müssen immer gegeben sein. Daher ist man immer bestrebt, trotz aller Vereinfachungen, dass Modell so realitätsnah wie möglich zu gestalten (Klein, 2011). In (Klein, 2011) sind fünf Schritte definiert, welche eine generelle Vorgehensweise beim Erstellen eines Modelles beschreiben. Im Folgenden werden diese einzelnen Punkte genannt und erörtert, um diese später im Kapitel 2.4.2. auf das vorliegende physikalische Problem anzuwenden. Im ersten Schritt muss ein finites Modell entwickelt werden, dass dem mechanischen Verhalten des Bauteils entspricht. Dabei geht es darum, aus dem vorliegenden Experiment zu entscheiden, wie die einzelnen Baugruppen als Elemente im Modell realisiert und vereinfacht werden können. Dabei ist bei mehreren Baugruppen auch zu berücksichtigen, welchen Kontakttypen eine Rolle spielen.

2.4.2. Modellvorstellungen

Grundlage der Modellvorstellung bildet ein Siliziumchip (blau), welcher mittels Die Attach (rot) auf einem Stück Leadframe aus Kupfer (lila) aufgeklebt wird. Anschließend wird Mold Compound (hellblau) hinzugefügt, das den Chip und den Die Attach oberhalb des Leadframes umschließt (siehe Abbildung 14). Die Dimensionen der einzelnen Bauteile wurden mittels optischer Mikroskopie beziehungsweise Röntgentomografie bestimmt. Das physikalische Modell wird durch das mechanische Verhalten (Ausdehnen und Zusammenziehen) von verschiedenen Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen beschrieben.

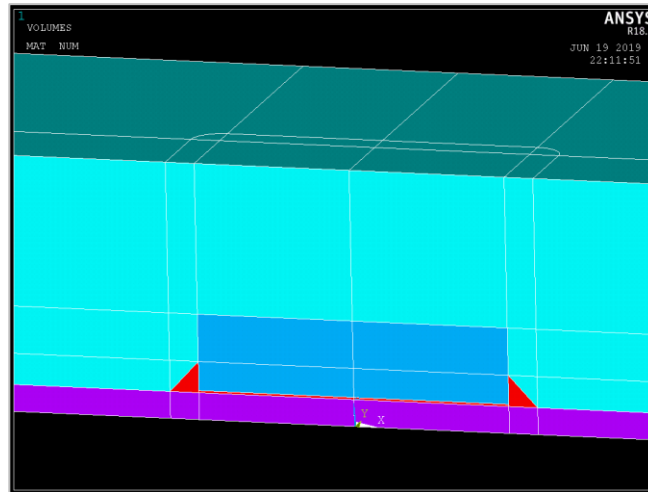


Abbildung 14: Darstellung des Geometriemodells für die Simulation in ANSYS Classic

Als Materialmodell wurde für den Chip orthotropes Silizium angenommen. Beim Die Attach wird ein Model verwendet, dass sowohl den elastischen als auch den viskosen Teil des Klebers abbildet. Das bedeutet, dass der Kleber bei mechanischer Beanspruchung sowohl Eigenschaften von Festkörpern als auch von Flüssigkeiten zeigt. Die sogenannten viskoelastischen Eigenschaften des Klebers wurden experimentell mittels DMA (Dynamische Mechanische Analyse) bestimmt. Charakteristisch für solche Materialien ist, dass der viskoelastische Effekt sowohl zeit- als auch temperatur-, geschwindigkeits-, frequenz- und belastungsabhängig ist (Grellmann, et al., 2015).

Für die mathematische Beschreibung des viskoelastischen Materialmodells wird eine Verallgemeinerung des Feder-Dämpfungs-Models aus (Stommel, et al., 2018) verwendet. Aus diesem Modell ergeben sich für das Maxwell-Modell folgenden Beziehungen (Stommel, et al., 2018):

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_v} + \frac{1}{\eta} \right) \text{ für die Retardation (Verzögerung)} \quad [220]$$

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E_v \cdot e^{-\frac{t \cdot E_v}{\eta}} = \varepsilon_0 \cdot E_v \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ für die Relaxation} \quad [221]$$

Wobei τ als Relaxationszeit bezeichnet wird und die Viskosität des Dämpfers beschreibt. E_v ist die Steifigkeit der Feder im Maxwell-Modell. Mit Hilfe dieser Parameter kann der zeitliche Verlauf der Spannung und der Dehnung für einen Relaxations- beziehungsweise Retardationsversuch beschrieben werden (Abbildung 15).

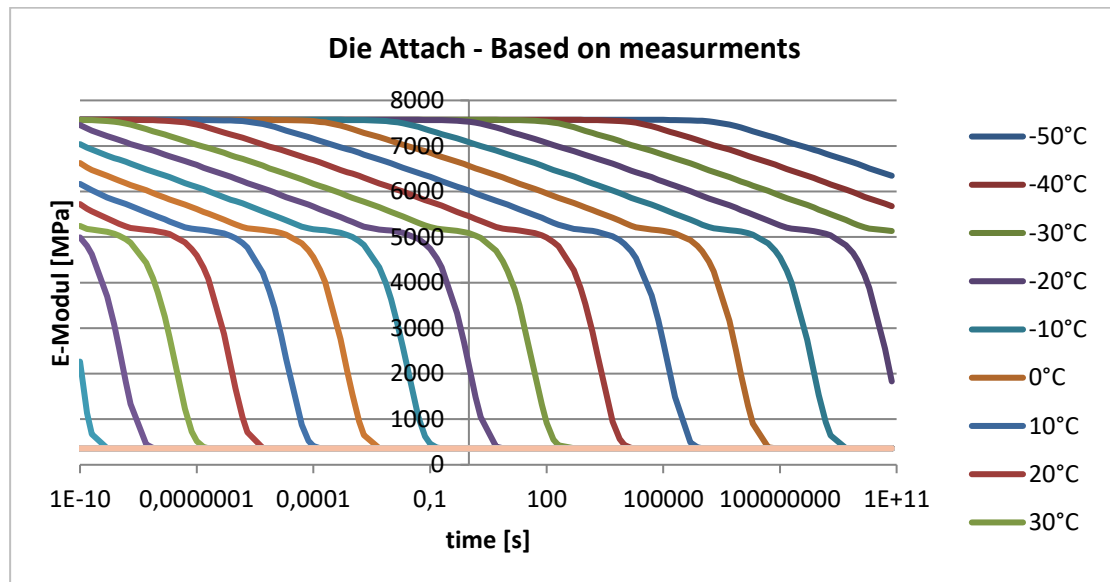


Abbildung 15: Darstellung des E-Moduls in Abhängigkeit von der Zeit [Dandong]

Jedoch wird das Verhalten eines Thermoplastes nur unzureichend durch diese Formeln beschrieben, da eine Relaxation immer den Spannungswert Null als Ergebnis zeigt (Gleichung [221]). Polymere in Relaxationsversuchen besitzen hingegen eher einen endlichen Spannungswert (Stommel, et al., 2018). Um einen Thermoplast für die Simulation besser beschreiben zu können, wird das in der Gleichung [220] und [221] angenommene Maxwell-Modell durch ein zusätzliches Maxwell-Element ergänzt. Dieses Element liegt parallel zur ersten Feder. Die Steifigkeit der zweiten Feder wird dabei folgendermaßen beschrieben (Stommel, et al., 2018):

$$E_0 - E_v \quad [222]$$

Wobei E_0 die Steifigkeit des Thermoplastes nach einer kurzzeitigen Belastung ist. Für den Fall einer kurzzeitigen Belastung wird der Dämpfer des Maxwell-Elements aus Gleichung [220]

blockiert. Die Steifigkeit des gesamten Systems ergibt sich dann wie folgt (Stommel, et al., 2018)t:

$$E_{ges} = (E_0 - E_v) + E_v = E_0 \quad [223]$$

Wendet man nun die Gleichung [223] auf die Gleichung [221] an, so erhält man für die Relaxation (Stommel, et al., 2018):

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \varepsilon_0 \cdot (E_0 - E_v) + \varepsilon_0 \cdot E_v \cdot e^{-\frac{t \cdot E}{\eta}} \\ &= \varepsilon_0 \cdot E_0 \left(1 - \frac{E_v}{E_0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}} \right) \right) \\ &= \varepsilon_0 \cdot E(t) \end{aligned} \quad [224]$$

Da die Gleichung der Relaxation [224] den Kurvenverlauf einer Exponentialfunktion als Ergebnis besitzt, jedoch der Kurvenverlauf von Thermoplasten noch komplexer ist, wird in der FEM das Verhalten solcher viskoelastischen Materialien häufig als sogenannte Prony-Reihe beschrieben (Abbildung 16).

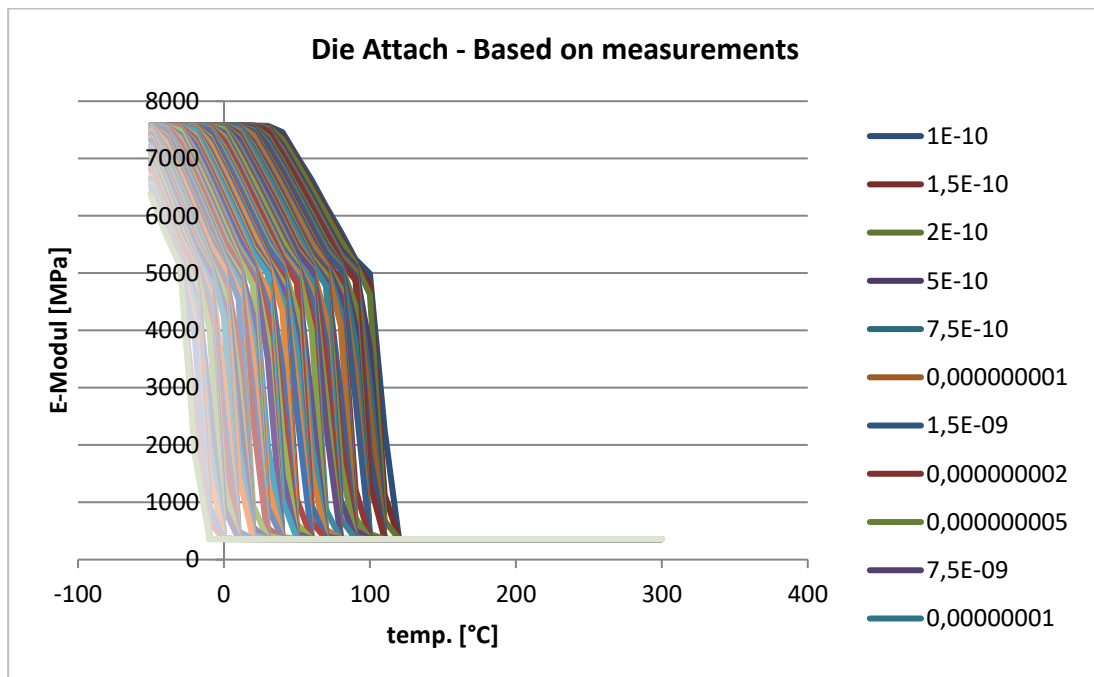


Abbildung 16: Darstellung des E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [Dandong]

Prony-Reihe bedeutet, dass mehrere e-Funktionen aufsummiert werden und somit das Modell als eine Parallelschaltung von vielen Maxwell-Elementen beschrieben wird (Grellmann, et al., 2015).

Auch für den Mold Compound wurde das viskoelastische Materialmodell angenommen. Als Leadframe-Material wurde das Modell für Kupfer gewählt. Wichtig für die Simulation der hintereinander ablaufenden Prozessschritte ist, dass das Hinzufügen neuer Materialien (Die Attach und Molding Compound) immer bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur (T_G) des jeweiligen Materials stattfindet. Dadurch wird gewährleistet, dass die Materialien zu Beginn des jeweiligen Prozessschritts spannungsfrei sind.

In Abbildung 17 sind die sechs Temperaturschritte zu sehen, welche den Chipaufbau simulieren. Zu Beginn wird eine Temperatur von 200 °C angenommen. Dies ist die Temperatur, bei welcher der Chip auf das Kupfer geklebt wird. Nach dem Prozess wird der auf dem Kupfer geklebte Chip auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach dem Erreichen der Raumtemperatur wird der Aufbau auf 270 °C erhitzt, bei dieser findet dann der Wirebond-Prozess statt. Nach dem Wirebond-Prozess wird der gesamte Aufbau wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Für den Mold-Prozess wird zunächst eine Temperatur von 230 °C angenommen, bei der die Mold-Masse im spannungsfreien Zustand hinzugefügt wird. Der eigentliche Mold-Prozess findet dann bei 175 °C statt. Auch nach diesem Prozess wird der nun komplett fertig vergossene Chip inklusive Leadframe wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Dort findet auch der letzte Simulationsschritt statt und soll die Lagerung des Bauteiles darstellen. Dieser Schritt wird zusätzlich simuliert, um sicherzustellen, dass sich die mechanische Spannung während der Lagerung bei Raumtemperatur nicht noch einmal verändert.

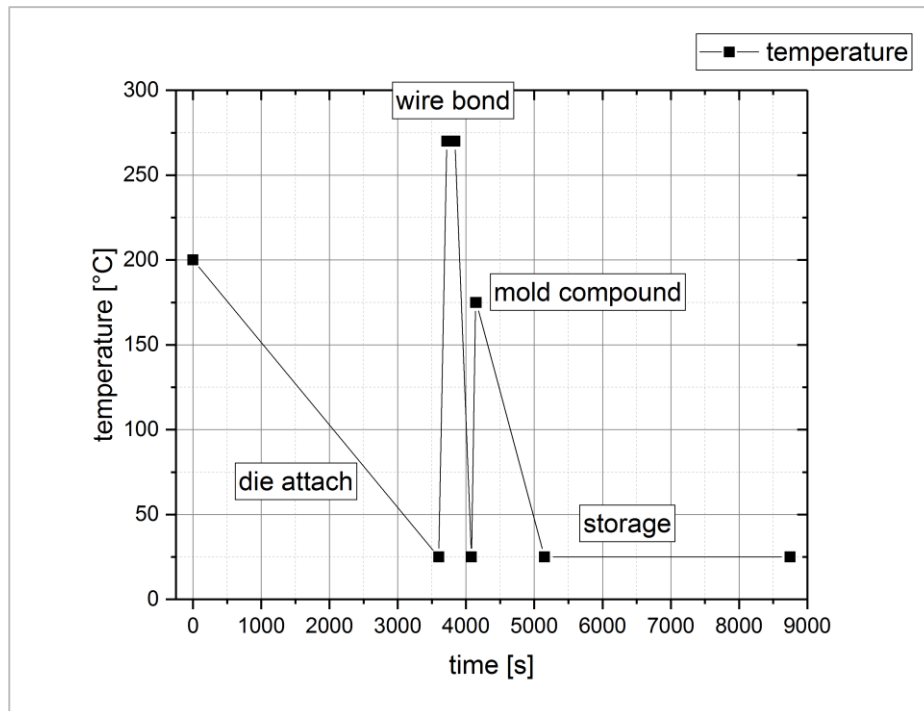


Abbildung 17: Darstellung des für die Simulation angenommenen Temperaturprofils

Das beschriebene Simulationsmodell bildet die Grundlage für alle weiteren Simulationen. So baut die Simulation der partiellen Dekapsulierung von oben und von der Seite, sowie die Simulation des Lochfräsens auf diesem Simulationsmodell auf. Für die partielle Dekapsulierung wurde vereinfacht angenommen, dass pro Dekapsulierschritt eine Mold Compound-Schicht mit einer Dicke von 100 μm entfernt wird. Für das Fräsen der Löcher wurde festgelegt, dass diese nicht rund, sondern viereckig sind. Diese Annahmen vereinfachen die Simulation, da das gewählte Netz eine Maschenweite von 50 μm und aus tetraederförmigen Zellen besteht.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Experimenteller Aufbau und Durchführung

Bevor mit der Untersuchung des Einflusses des partiellen Dekapsulierens begonnen werden konnte, wurden zunächst Testchips aufgebaut. Diese erste Aufbaureihe wurde dazu genutzt, den Einfluss der einzelnen Prozessschritte Die Attach, Wirebonding und Molding zu untersuchen und zu verstehen. Die Ergebnisse der Raman-Messungen sind hierfür in Kapitel 3.3.2. und die Ergebnisse der piezo-resistiven Messungen in Kapitel 3.5.2. zu finden. Für die Untersuchung des Einflusses des jeweiligen Prozessschritts wurden pro Aufbauschritt 30 Spannungsmesschips hergestellt, bei denen die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche mittels Raman-Spektroskopie und mit der piezo-resistiven Messmethode gemessen wurde. Außerdem wurden an diesen Chips auch die Experimente zur Charakterisierung der jeweiligen Messmethode durchgeführt.

Die Ergebnisse für die Raman-Messungen sind in Kapitel 3.3.1. und die Ergebnisse der elektrischen Messung in Kapitel 3.4.2 zu finden. Anhand dieser Vorversuche wurden anschließend Methoden entwickelt und Messvorschriften festgelegt, welche bei der zweiten Aufbaureihe berücksichtigt wurden. Zusätzlich wurden die Spannungsmesschips dazu verwendet, den Einfluss des Plasmaätzens zum Entfernen von Imid (Kapitel 3.5.1.) zu untersuchen und um Schliffe zu erzeugen, an denen mit Hilfe der Raman-Spektroskopie die Verteilung der Einflüsse der jeweiligen Prozessschritte auf die mechanische Spannung über die Chipdicke gemessen wurde. (Kapitel 3.3.2.). Damit war es möglich, den lateralen Einfluss des Wirebonding-Prozesses und die Einflusstiefe im Chip zu untersuchen.

Bei der zweiten Aufbaureihe wurde die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche prozessbegleitend mit dem Raman-Spektrometer und der piezo-resistiven Messmethode bestimmt. Darüber hinaus wurde an diesen Chips die eventuell auftretende Änderung der Chipbiegung mittel Weißlichtinterferometrie gemessen, um diese dann später mit den Ergebnissen aus der Raman-Messung zu vergleichen.

All die zuvor genannten Experimente dienen dazu, den globalen Einfluss der einzelnen Prozessschritte zu untersuchen, da sich hier die mechanische Spannung auf dem gesamten Chip ändert. Bei der partiellen Dekapsulierung hingegen ändert sich die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche nur lokal in den Bereichen, die sich in der Nähe des entfernten Materials befinden.

Eine partielle Dekapsulierung ist bei vergossenen Chips notwendig, da die Raman-Spektroskopie für die Bestimmung der mechanischen Spannung einen optischen Zugang zur Chipoberfläche erfordert. Als mögliche Präparationsmethoden für das partielle Dekapsulieren wurden zunächst das mechanische Schleifen und der Materialabtrag mittels Focus Ion Beam (FIB) betrachtet (Kapitel 3.3.1). Um den Einfluss dieser beiden Methoden zu untersuchen, wurde ein weiterer Modellchip aus reinem monokristallinen Silizium ohne Metallisierung und ohne Passivierung verwendet, da dadurch die Einflüsse beider Präparationsmethoden deutlicher und einfacher zu erkennen sind. Zusätzlich wurden an diesem Modellchip die Einflüsse unterschiedlicher Messparameter wie die Laserleistung, die Aquisitionszeit, die Informationstiefe und die Temperatur vom Raman-Spektrometer untersucht (Kapitel 3.2.3).

Das mechanische Schleifen und der Materialabtrag mittels FIB sind zwar vielversprechende Methoden, um auf einem Chip definierte Bereiche zugänglich zu machen, kommen aber für die Dekapsulierung von gemoldeten Chips nicht in Frage, da der Materialabtrag und damit der Einfluss auf die mechanische Spannung im Chip zu groß ist. Aus diesem Grund, wurde nach Methoden gesucht, die es erlauben das Mold Compound lokal an definierten Stellen zu entfernen. Je weniger Mold Compound entfernt wird, desto geringer ist auch der Einfluss auf die mechanische Spannung im Chip. Für die Charakterisierung dieser Methoden wurde der Spannungsmesschip verwendet, da es nur mit ihm möglich ist, die mechanische Spannung im Chip vor und nach dem partiellen Dekapsulieren zu bestimmen und daraus den Einfluss der jeweiligen Dekapsuliermethode zu bestimmen.

Für das Freilegen lokaler Bereiche des Spannungsmesschips wurden die Präparationsmethoden Laser-Dekapsulieren und das Dekapsulieren mittels Mikrofräse herangezogen. Beim Laser-Dekapsulieren wurde in einem Telexperiment das Mold Compound in 100 µm-Schritten nach und nach flächig von oben bis zur Oberkante des Chips abgetragen.

In einem weiteren Telexperiment wurde das Mold Compound hingegen in 100 µm-Schritten von der langen Seite bis zur Kante des Spannungsmesschips entfernt. Nach jedem Schritt wurde die resultierende Schichtdicke des Mold Compounds mit Hilfe der Röntgentomographie gemessen und anschließend die mechanische Spannung mit der piezo-resistiven Messung bestimmt (Kapitel 3.5.3).

In einem zusätzlichen Experiment wurde versucht das Mold Compound nicht ganzflächig, sondern an einzelnen definierten Bereichen mittels partiellen Laser-Dekapsulierens zu entfernen.

Darüber hinaus wurden bei einem weiteren Versuch mit Hilfe der Mikrofräse kleine Löcher in das Mold Compound gebohrt, um die Chipoberfläche frei zu legen. Sowohl beim partiellen Laser-Dekapsulieren als auch beim Dekapsulieren mittels Mikrofräse wurden die mechanischen Spannungen auf dem Spannungsmesschip vor und nach dem Präparieren gemessen. Aus der Differenz beider mechanischer Spannungen war es möglich, den Einfluss dieser Methoden zu untersuchen (Kapitel 3.5.3.).

3.2. Stabilität und Zuverlässigkeit des Raman-Spektrometers

3.2.1. Informationstiefe im Silizium

Einer der wichtigsten Parameter für die Raman-Messung ist die Informationstiefe (Adar, 2010). Gerade wenn es um die Frage geht, aus welcher Tiefe die Informationen kommen und wie groß das Anregungsvolumen ist, spielt die Informationstiefe eine entscheidende Rolle.

Die Höhe des Anregungsvolumens (Tiefe des Laserfokus) lässt sich näherungsweise mit Hilfe der Numerischen Apertur der verwendeten Objektivs und der Laserwellenlänge des eingebauten Lasers berechnen (Bleisteiner, 2009).

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Laser handelt es sich um einen frequenzverdoppelten Nd:YAG-Festkörper-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm.

$$D. O. F. (Depth\ of\ Focus) \sim \frac{4 \cdot \lambda}{(NA)^2} \quad [225]$$

Wobei λ die Wellenlänge des anregenden Laserlichts und NA die Numerische Apertur des verwendeten Objektivs ist. Unter Verwendung der Formel [224] ergeben sich folgende Werte für die Fokustiefe (Tabelle 6). Die Werte für die Numerische Apertur der verwendeten Objektivs stammen aus (Bleisteiner, 2009).

Tabelle 6: Bestimmung der Fokustiefe nach Formel [224] aus der Numerischen Apertur und der Wellenlänge des anregenden Lasers (Bleisteiner, 2009)

Objektiv [Vergrößerung]	Numerische Apertur [-]	Fokustiefe [μm]
x10	0,25	34,05
x50	0,75	3,78
x100	0,90	2,62
x50 LWD	0,50	8,51
x100 LWD	0,80	3,33

In Abbildung 18 kann man deutlich erkennen, dass die Fokustiefe der komplette Bereich ober- und unterhalb der minimalsten Strahltaile des Laserstrahls ist. Geht man davon aus, dass die minimalste Strahltaile auf der Probenoberfläche liegt, wenn der Laser auch darauf fokussiert ist, dann entspricht die theoretische Informationstiefe der Fokustiefe unterhalb der minimalsten Strahltaile (halbe Fokustiefe). Für das in dieser Arbeit verwendete Objektiv (x100) ergibt sich daraus eine theoretische Informationstiefe von 1,3 μm .

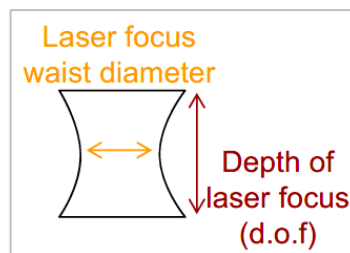


Abbildung 18: Graphische Darstellung der Fokustiefe und der Strahltaile (Bleistener, 2009)

Dieser theoretische Wert für die Informationstiefe berücksichtigt zwar die Wellenlänge des anregenden Laserlichts, jedoch nicht die Materialeigenschaften der zu messenden Probe und kann deswegen nur als Näherung verwendet werden. Laut (De Wolf, et al., 1998) ist die Informationstiefe abhängig vom Material.

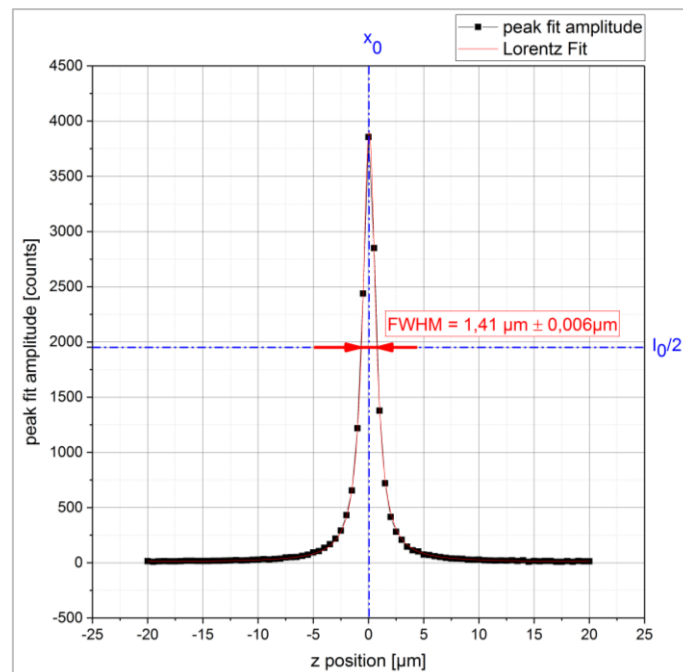


Abbildung 19: Intensität des Siliziumpeaks gemessen an verschiedenen Z-Positionen. Negative Z-Werte bedeuten, dass oberhalb der Probenoberfläche gemessen wurde und positive Z-Werte bedeuten, dass unterhalb der Probenoberfläche gemessen wurde. Die Probenoberfläche befindet sich bei Z=0.

Um die Informationstiefe zu bestimmen, wurden als erstes einige Testmessungen an einem polierten Siliziumchip gemacht. Dabei wurden zunächst mittels Z-Scan Siliziumspektren an unterschiedlichen Z-Positionen aufgenommen und anschließend die Größe des Spalts, das sogenannte „Hole“, verändert, um die Informationstiefe in Abhängigkeit der Spaltgröße zu bestimmen (Adar, 2010). Die Ergebnisse aus den beiden Messungen sind in Abbildung 19 und 20 zu sehen.

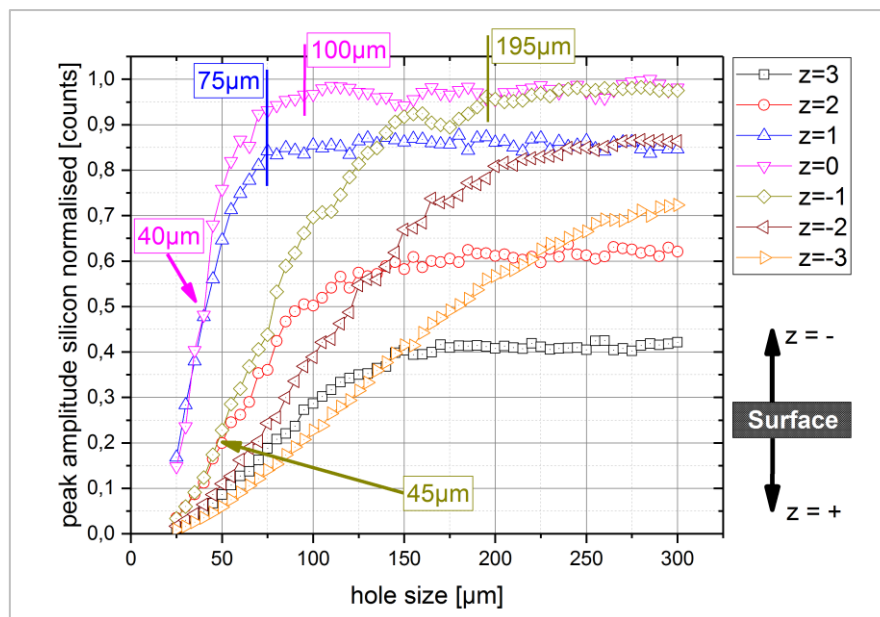


Abbildung 20: Darstellung der auf das Maximum normalisierten Amplitude des Siliziumpeaks bei unterschiedlichen „Hole“-Öffnungen in Abhängigkeit der Z-Position

Alle Messungen wurden mit dem Autofokus durchgeführt. Das bedeutet, dass die Software zunächst die Oberfläche sucht und dann den jeweiligen Abstand ($z=-3$; -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 ; 3) zur Oberfläche einstellt. Dadurch wird gewährleistet, dass jede der einzelnen Messungen bei verschiedenen „Hole“-Öffnungen bei den unterschiedlichen Z-Positionen immer den gleichen Abstand zur Oberfläche haben und dadurch ausgeschlossen werden kann, dass eine eventuell auftretende Verschiebung der Probe zu einer Änderung der Amplitude führt. Die Messabfolge wurde so eingestellt, dass als erstes die „Hole“-Öffnung variiert wurde und im Anschluss daran die Z-Position. Bei $z=3$ befindet sich die Mitte des Anregungsvolumens $3\mu\text{m}$ unterhalb der Probenoberfläche. Die Position $z=-3$ bedeutet demnach, dass sich die Mitte des Anregungsvolumens $3\mu\text{m}$ oberhalb der Probenoberfläche befindet. Die normalisierten Amplituden bei den unterschiedlichen „Hole“-Öffnungen in der jeweiligen Z-Position zeigen eine klare Abhängigkeit der Amplitude sowohl von der Z-Position als auch von der „Hole“-Öffnung.

Die Graphen der Z-Positionen $z=0$ und $z=1$ zeigen den steilsten Anstieg und haben bis zu einer „Hole“-Öffnung von $40\ \mu\text{m}$ die gleiche Amplitude. Das bedeutet, dass die Amplitude des Siliziumpeaks bereits bei kleinen Änderungen der „Hole“-Öffnung stark zunimmt. Bei den Messungen auf der Siliziumoberfläche beziehungsweise $1\ \mu\text{m}$ unterhalb haben die „Hole“-Öffnungen bis $100\ \mu\text{m}$ einen starken Einfluss auf die Intensität des Messsignals und damit auch indirekt auf die Messzeit, da diese bei kleinerer Intensität erhöht werden muss, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Der gleiche Kurvenverlauf bei $z=0$ und $z=-1$ deutet darauf hin, dass die Informationstiefe bis zu einer „Hole“-Öffnung von $40\ \mu\text{m}$ dieselbe ist. Der Graph von $z=1$ ($h=75\ \mu\text{m}$) nähert sich bei einer „Hole“-Öffnung von $75\ \mu\text{m}$ einer vertikalen Asymptote an, was bedeutet, dass das Maximum der Informationstiefe erreicht ist. Im Vergleich dazu liegt die Amplitude bei Messungen auf der Siliziumoberfläche und einer „Hole“-Öffnung von $75\ \mu\text{m}$ bei nur $85\ \%$.

Die Graphen für $z=2$ und $z=-1$ besitzen ebenfalls die gleiche Amplitude bis zu einer „Hole“-Öffnung von $45\ \mu\text{m}$. Danach wird der Anstieg des Graphen von $z=2$ kleiner. Das bedeutet auch hier, dass bis zu einer „Hole“-Öffnung von $45\ \mu\text{m}$ das gleiche Volumen an Silizium angeregt wird. Vergleicht man den Graphen $z=-1$ mit dem Graphen $z=0$ so fällt auf, dass sich beide bei der gleichen Intensität des Siliziumsignals der horizontalen Asymptote annähern. Lediglich die „Hole“-Öffnung muss bei einer Fokusposition von $1\ \mu\text{m}$ oberhalb der Probenoberfläche doppelt so groß gewählt werden ($195\ \mu\text{m}$). Der Graph von $z=2$ nähert sich bei einer „Hole“-Öffnung von $155\ \mu\text{m}$ einer horizontalen Asymptote an. Die maximale Intensität des Siliziumsignals beträgt bei $z=2$ im Vergleich zur Intensität gemessen auf der Siliziumoberfläche ($z=0$) nur $60\ \%$. Der Grund für die geringen maximalen Amplituden von $60\ \%$ bei $z=2$ und $40\ \%$ bei $z=3$, ist die zunehmende Absorption durch die zunehmende Dicke des Siliziums. Das in $2\ \mu\text{m}$ beziehungsweise $3\ \mu\text{m}$ rückgestreute Raman-Signal muss erst die $2\ \mu\text{m}$ oder $3\ \mu\text{m}$ bis zur Oberfläche überwinden. Beim Durchqueren des Siliziums werden vom zurückgestreuten Raman-Signal wiederum Streuungen angeregt. Dadurch verliert das in $2\ \mu\text{m}$ und $3\ \mu\text{m}$ erzeugte Raman-Signal einen Großteil seiner ursprünglichen Energie. Je dicker dabei die Schicht ist, welche vom zurückgestreuten Raman-Signal überwunden werden muss, umso geringer ist letztendlich auch die resultierende Amplitude des Raman-Signals an der Siliziumoberfläche. Das Erreichen der horizontalen Asymptote der Graphen $z=2$ und $z=3$ bedeutet demnach, dass trotz größer werdendem „Hole“ die erzeugte Raman-Streuung aus tieferen Siliziumschichten nicht mehr genügend Energie besitzt, um an die Oberfläche und somit zum Detektor zu gelangen. Der Graph von $z=3$ erreicht genauso wie der Graph von $z=2$ die horizontale Asymptote bei einer „Hole“-Öffnung von $150\ \mu\text{m}$.

Das heißt, unabhängig von der Fokusposition beider Messungen, ist das maximal anzuregende Volumen des Siliziums gleich groß. Für Messungen an der Oberfläche empfiehlt sich demnach eine „Hole“-Öffnung von 100 μm .

Zusammenfassend kann man sagen, auch wenn nicht auf die Oberfläche fokussiert wurde, ist es dennoch möglich, die maximale Intensität des Siliziumpeaks zu erreichen. Man benötigt dazu nur eine größere „Hole“-Öffnung. So erreicht man auch bei einer z-Position von $z=-2$ und einem „Hole“ von 250 μm das gleiche Anregungsvolumen und damit die gleiche Amplitude wie bei $z=1$ (85 % der maximalen Leistung).

Als nächsten Versuch wurde mit Hilfe der Schleifmaschine Allied MultiPrep und einem speziell entwickelten Aufsatz ein Siliziumkeil erzeugt. Die Idee dabei war, bei konstanter Z-Position in einem Linienscan über dem Siliziumkeil die Siliziumschichtdicke zu verändern und dadurch die Informationstiefe des Siliziums zu bestimmen. Der Winkel des Siliziumkeils wurde mit Hilfe des Weißlichtinterferometers CT100 bestimmt (Abbildung 21).

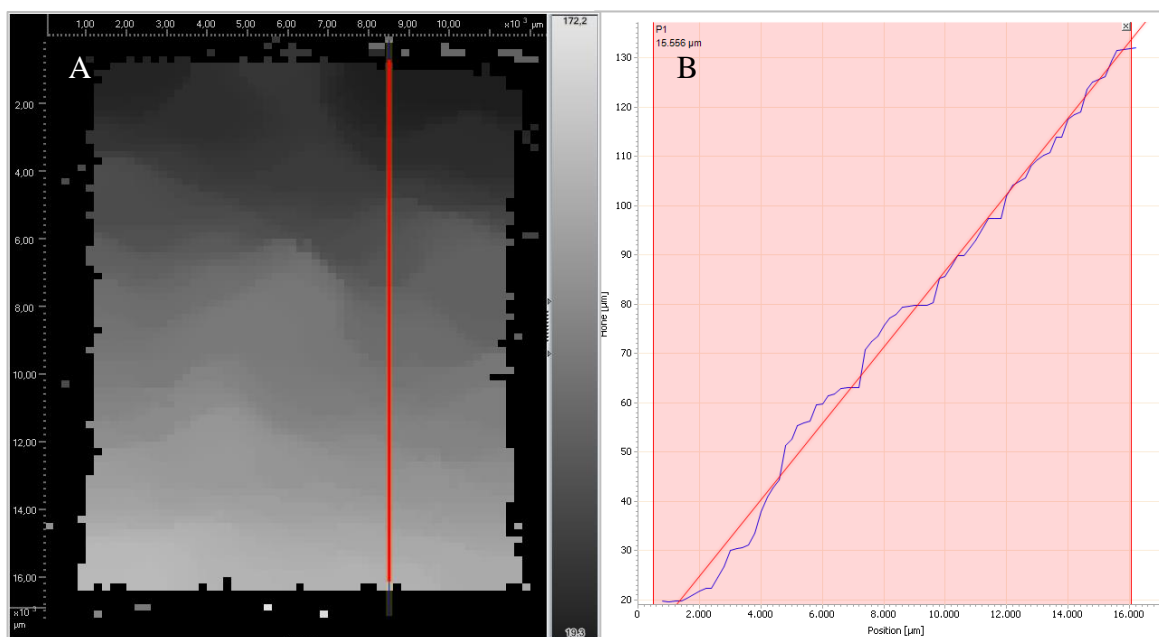


Abbildung 21: Ergebnis der Weißlichtinterferometer-Messung; Übersichtsbild (A) und Höhenprofil der Siliziumschicht an der rot markierten Stelle (B)

Der Startpunkt für den Linienscan der Raman-Messung wurde in einem definierten Abstand zur dünnsten Stelle des Keiles festgelegt. Dies dient der Reproduzierbarkeit, da diese Position jederzeit wieder angefahren und von dort aus die Messung gestartet werden kann. An dieser Position wurde dann auf die Oberfläche des Siliziumkeils fokussiert und die X-, Y- und Z-Koordinaten dieses Punktes als Koordinatenursprung in der Raman-Software festgelegt.

Durch die Fokussierung wird erreicht, dass sich an dieser Position, nach der obigen Formel [224], die untere Hälfte des Anregungsvolumens komplett im Material befindet. Von dieser Position aus, wurde nun die Probe um eine definierte Entfernung von 600 μm nach rechts bewegt. Dadurch wurde das Anregungsvolumen aus der Probe heraus bewegt (Abbildungen 22, 23, 24). Anschließend wurde ein Linienscan über 1200 μm mit einer Schrittweite von 2 μm durchgeführt.

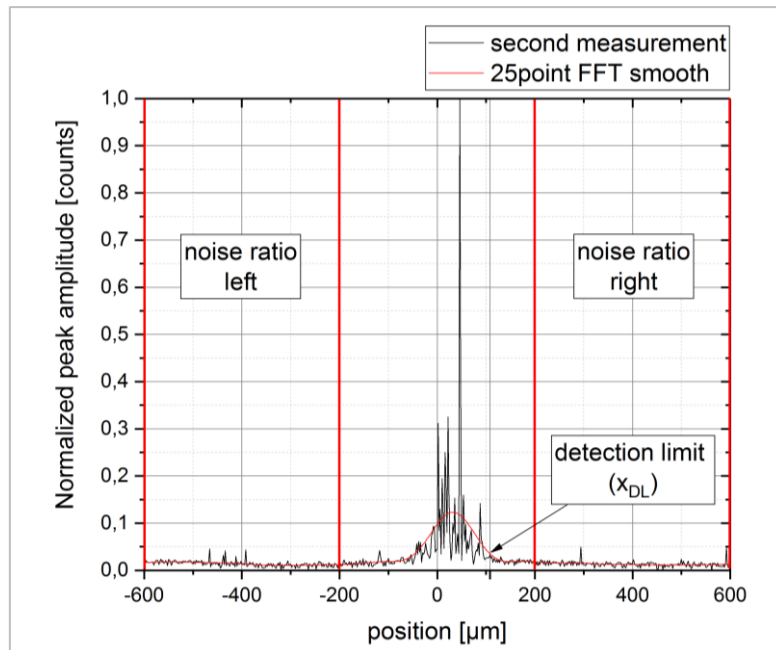


Abbildung 22: Darstellung der gefitteten Peak-Amplitude über die verschiedenen Positionen des Linienscans

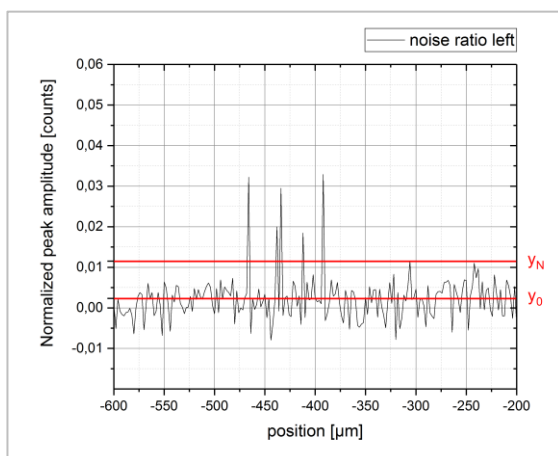


Abbildung 23: Bestimmung des Rauschsignals aus dem Mittelwert des Signals y_0 und der dreifachen Standardabweichung y_N für den linken Bereich

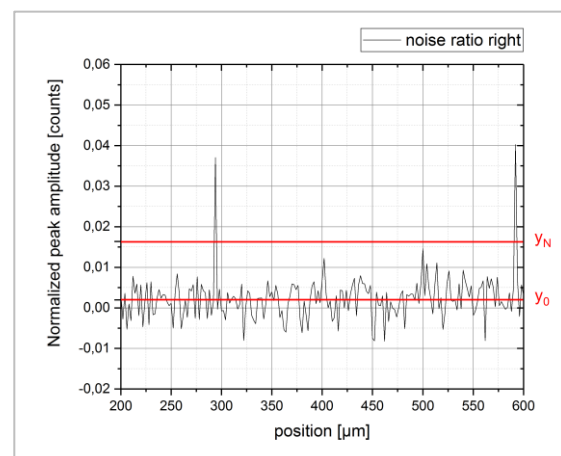


Abbildung 24: Bestimmung des Rauschsignals aus dem Mittelwert des Signals y_0 und der dreifachen Standardabweichung y_N für den rechten Bereich

In Abbildung 22 ist deutlich zu sehen, dass die Intensität des Siliziumpeaks mit zunehmender Entfernung zum Startpunkt des Linienscans ansteigt. Das bedeutet, dass das Anregungsvolumen des Laserstrahls immer weiter in die Probe hineinfährt, das Maximum bei $x=0$ erreicht und dann durch die steigende Absorption des immer dicker werdenden Materials wieder kleiner wird. Bei dem Punkt, an dem das abnehmende Signal unter das Signal-Rausch-Verhältnis (Nachweisgrenze) von 3:1 fällt, endet die Informationstiefe des Raman-Spektrometers im Material (Melzer, 2018).

Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde der Tisch beziehungsweise die Probe verfahren und anschließend auf die Probenoberfläche fokussiert. Um sicher zu stellen, dass zu Beginn der Messung der Laserstrahl auch wirklich auf die Probenoberfläche fokussiert ist, wurde beim Starten der Messung ein softwaregesteuerter Autofokus durchgeführt. Dieser fährt schrittweise in einem definierten Z-Bereich verschiedenen Z-Positionen an und misst dabei die Reflexion. Ist der Punkt mit der maximalen Reflexion des Laserlichts gefunden, wird ein kleinerer Bereich mit kleineren Z-Schritten abgefahren. Dadurch wird der Bereich mit der maximalen Reflexion noch exakter bestimmt. Die Z-Position mit der maximalen Intensität des reflektierten Laserlichts wird abgespeichert und als Probenoberfläche angenommen.

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen durchgeführt. Die Ergebnisse der berechneten Informationstiefe aus den unterschiedlichen Versuchsreihen sind in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen zur Bestimmung der Informationstiefe im Silizium

Number []	y_0 left [counts]	y_N left [counts]	y_0 right [counts]	y_N right [counts]	mean value noise [counts]	detection limit (x_{DL}) [counts]	x position amplitude $\leq x_{DL}$ [μm]	Information depth [μm]
1	0,002	0,012	0,0019	0,01638	0,012	0,036	108	0,94
2	6,50E-04	0,012	0,0028	0,01783	0,013	0,039	120	1,05
3	0	0	0,0012	0,05896	0,028	0,086	122	1,07
4	0,013	0,125	4,94E-03	0,07193	0,089	0,268	104	0,91

Zur Bestimmung der Informationstiefe wurde zunächst das Rausch-Signal-Verhältnis aus der Differenz des Mittelwerts des Rausch-Signals und dessen Amplitude bestimmt. Als Amplitude wurde hierbei nicht das Maximum des jeweiligen Rausch-Signals verwendet, sondern der Wert der dreifachen Standardabweichung gewählt, da beispielsweise durch das mechanische Schleifen tiefe Kratzer erzeugt werden können, die zu Ausreißern führen. Die dreifache

Standardabweichung bedeutet, dass 99,73 % aller Werte innerhalb des Bereiches der dreifachen Standardabweichung liegen (Melzer, 2018) und somit ein Großteil der Ausreißer nicht berücksichtigt wird. Für die Berechnung des Rausch-Signals wurden Bereiche aus dem Liniengraph gewählt, bei denen keine Siliziumsignale zu erkennen sind. Dies sind in den meisten Fällen Bereiche links und rechts vom Maximum des Siliziumsignals (Abbildung 23 und 24).

Im Anschluss daran wurde die Nachweißgrenze (Signal-Rausch-Verhältnis 3:1) über die Multiplikation des Mittelwerts des Rausch-Signals von der rechten und linken Seite der Siliziumsignale mit der Zahl 3 bestimmt. Daraufhin wurde in Abbildung 22 die X-Position bestimmt, bei welcher die gefittete Amplitude zum ersten Mal dauerhaft unter die zuvor bestimmte Nachweißgrenze fällt. Aus dieser X-Position (μm) wurde dann über den zweiten Strahlensatz die Informationstiefe bestimmt.

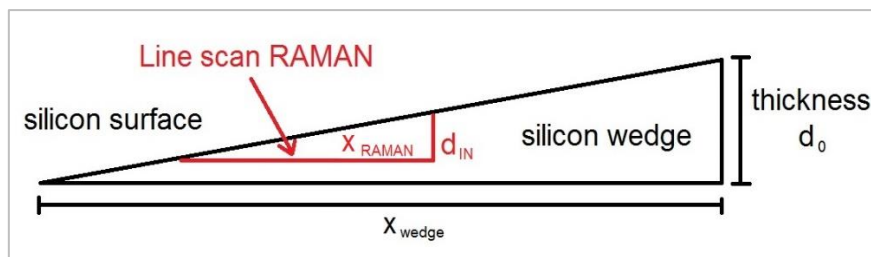


Abbildung 25: Schematische Darstellung des angewendeten Strahlensatzes zur Bestimmung der Informationstiefe

Mit Hilfe dieses Strahlensatzes kann unter der Bedingung, dass die Informationstiefe im Silizium d_{IN} und die Schichtdicke des Siliziums d_0 parallel sind, folgendes Verhältnis aufgestellt werden:

$$\frac{d_{IN}}{d_0} = \frac{x_{RAMAN}}{x_{wedge}} \quad [226]$$

Stellt man nun dieses Verhältnis nach d_{IN} um, so erhält man:

$$d_{IN} = \frac{x_{Raman} \cdot d_0}{x_{wedge}} \quad [227]$$

Setzt man nun für x_{Raman} die X-Position ein, an der die gefittete Amplitude zum ersten Mal dauerhaft unter die Nachweißgrenze fällt und für d_0 und x_{wedge} die mit Hilfe des Weißlichtinterferometers CT100 bestimmte Dicke beziehungsweise Länge des Siliziumkeils ein, so erhält man die Informationstiefe im Silizium (rechte Spalte in Tabelle 7).

Vergleicht man die berechneten Informationstiefen miteinander, so fällt auf, dass die Werte um den Mittelwert $0,99 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $0,078 \mu\text{m}$ schwanken und somit eine hohe Übereinstimmung mit dem Literaturwert von $0,977 \mu\text{m}$ für einen Laser mit der Wellenlänge $530,9 \text{ nm}$ haben.

3.2.2. Stabilität des Lasers und der Referenzquelle

Nachdem die Informationstiefe bestimmt wurde, musste sichergestellt werden, dass sich die für die Messung verwendeten Parameter nicht ändern. Hierzu zählt in erster Linie die Laserleistung. Für die Bestimmung der Peak-Position des Siliziumpeaks und damit die Bestimmung der intrinsischen Spannung ist zudem die Stabilität der Neon-Plasma-Quelle wichtig. Diese dient als Referenzquelle am verwendeten Raman-Spektrometer.

Stabilität bedeutet, dass sich zum einen die Intensität über einen gewissen Zeitraum nicht verändert und zum anderen dass die Peak-Position konstant bleibt. Wenn sich die Intensität des Siliziumpeaks ändert, hat das einen großen Einfluss auf die Messung. So kann ein Sinken der Intensität dazu führen, dass das Signal-Rausch-Verhältnis unterschritten wird. Ein Intensitätsanstieg hingegen kann dafür sorgen, dass zu viel Energie in die Probe eingebracht wird und sich der Raman-Peak durch den Temperatureintrag verschiebt und nicht durch die intrinsische Spannung. Dadurch kann es zu Fehlinterpretation der Peak-Verschiebung kommen. Der Effekt der Laserleistung auf die Peak-Verschiebung wird im folgenden Kapitel 3.2.3. deutlich. Die Stabilität der Intensität vom Laser und der Neon-Plasma-Quelle wird über die jeweilige Peak-Amplitude bestimmt.

Zunächst wurde ein Zeitraum von 24 h festgelegt, in dem die Stabilitätsmessungen durchgeführt wurden. Dabei wurden die Raumtemperatur und die Temperatur in der Nähe des Raman-Spektrometers mit einem Thermoelement gemessen. Die Abbildung 26 zeigt das Ergebnis dieser Messung.

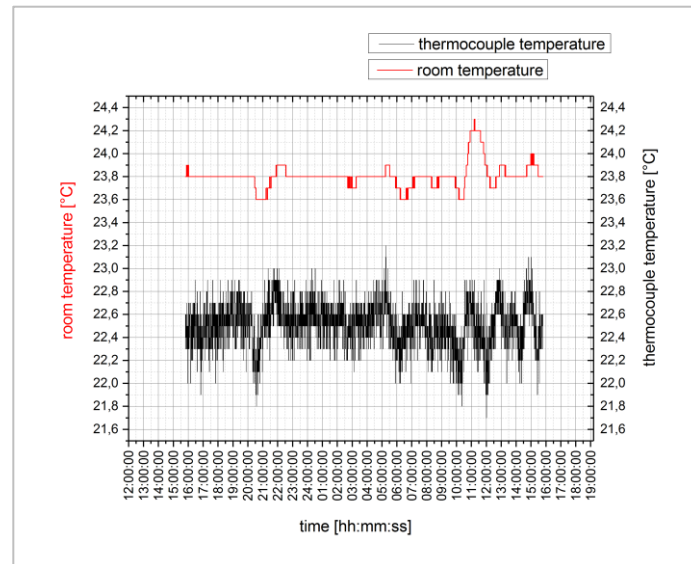


Abbildung 26: Darstellung der Temperaturschwankungen im Raum und am Raman-Spektrometer über 24 h

Die Temperaturmessungen zeigen, dass die Raumtemperatur mit 23,8 °C konstant ist und lediglich Schwankungen von +0,1 K und -0,2 K auftreten (Standardabweichung 0,104 °C). Einziger Ausreißer ist der Temperaturanstieg um 12 Uhr des zweiten Tages. Dort ändert sich die Temperatur um +0,5 K. Die Temperatur am Raman-Spektrometer zeigt ein Offset zur Raumtemperatur von ungefähr 1,4 K und weist deutlich größere Schwankungen auf. Der Mittelwert beträgt 22,5 °C und die Schwankungen liegen zwischen $\pm 0,8$ K (Standardabweichung 0,2 °C).

In der folgenden Abbildung 27 sind die Ergebnisse der 24 h-Messungen für die Stabilität der Neon-Plasma-Quelle und des Lasers zu sehen. Aus dieser Messung wird der Mittelwert der Differenz zwischen Neonpeak (277 cm^{-1}) und Siliziumpeak ($520,6 \text{ cm}^{-1}$) und der Schwankung der gemessenen Werte um den Mittelwert ermittelt. Im Normalfall wird diese Messung einmal jährlich durchgeführt.

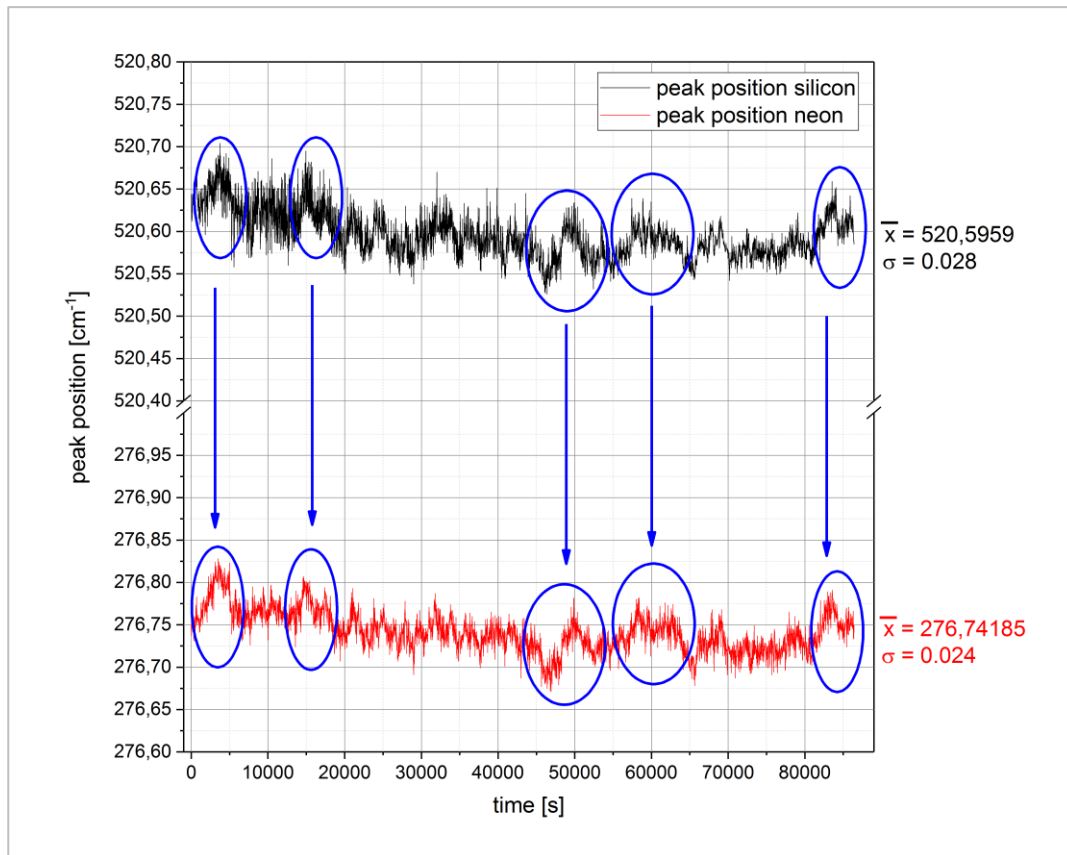


Abbildung 27: Schwankungen des Siliziumpeaks ($520,6 \text{ cm}^{-1}$) und des Neonpeaks ($276,7 \text{ cm}^{-1}$) über 24 Stunden

Bei einem regelmäßigen Monitoring wird der Abstand zwischen dem Neonpeak und dem Siliziumpeak überprüft. Kommt beim Vergleich dieses Abstands mit dem Mittelwert des Abstands aus der 24 h-Messung heraus, dass die Differenz größer als die dreifache Standardabweichung ist, muss die 24 h-Messung nochmal wiederholt werden. Ein Anstieg der Differenz ist meist ein Indikator für die Änderung der Wellenlänge des Lasers.

Der Grund für die Änderung der Wellenzahl aufgrund der Änderung der Wellenlänge des Lasers liegt bei der Software-Routine „Autocalibration“ des verwendeten Raman-Spektrometers. Hierbei wird zunächst die Gitterposition so eingestellt, dass die nullte Ordnung (Rayleigh-Streuung) des Lasers auf den Detektor trifft. Anschließend wird die Position des Gitters so eingestellt, dass dieses Mal die Wellenlänge des Lasers auf den Detektor trifft. Aus dem Abstand beider Gitterpositionen ergibt sich die Einteilung der einzelnen Gitterpositionen (Winkeleinstellungen des Gitters) entsprechend der Wellenzahlen. Ändert sich die Laserwellenlänge, so ändert sich auch die Position des Siliziumpeaks unabhängig vom Neonpeak und der Abstand zwischen beiden wird größer.

Die beiden Graphen in Abbildung 27 zeigen die Schwankung der gemessenen Peak-Position über einen Zeitraum von 24 Stunden. Die Peak-Position des Siliziumpeaks schwankt dabei um $520,59 \text{ cm}^{-1}$. Der Literaturwert für nicht verspanntes Silizium beträgt $520,5 \text{ cm}^{-1}$ - $520,6 \text{ cm}^{-1}$ (De Wolf, 2015) mit einer Standardabweichung von $0,028 \text{ cm}^{-1}$. Der Neonpeak schwankt um einen Mittelwert von $276,74 \text{ cm}^{-1}$ mit der Standardabweichung von $0,024 \text{ cm}^{-1}$.

Beide Graphen zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf und besitzen die gleichen markanten Bereiche (blau markiert). Solche Bereiche werden meistens durch Schwankungen des Messsystems erzeugt. Da die Neon-Plasma-Quelle erst über einen Strahlteiler im Mikroskopbereich des Raman-Spektrometers in den Strahlengang des reflektierten Laserlichts gebracht wird, lassen sich hauptsächlich Schwankungen im Sekundärstrahlengang durch die Änderung der Neonpeak-Position abbilden. Durch die Differenz beider Spektren können die Schwankungen, welche auf Änderungen im System basieren, eliminiert werden.

3.2.3. Einfluss der verschiedenen Messparameter auf die Messung

Einfluss der Laserleistung (ND-Filter)

Über ein Filtrerrad im Raman-Spektrometer ist es möglich, die Laserleistung auf durch die Filter vordefinierte Laserleistungen zu reduzieren. Die Leistungssprünge sind dabei wie folgt: 100 %, 50 %, 25 %, 10 %, 5 %, 1 %, 0,1 % und 0,01 %. Bevor mit den Spannungsmessungen begonnen werden konnte, wurde zunächst untersucht, ob die Laserleistung einen Einfluss auf die Verspannung im Silizium hat. Dafür wurde ein nicht verspannter Siliziumchip verwendet. Als Referenzquelle dient auch hier die Neon-Plasma-Quelle. Um alle Messungen miteinander vergleichen zu können und um sicherzustellen, dass alle unter gleichen Messbedingungen durchgeführt wurden, wurde dem Laser und der Neon-Plasma-Quelle eine gewisse Aufwärmzeit gegeben. Laut Hersteller (Laser-Quantum) der Neon-Plasma-Quelle und des Lasers brauchen beide Quellen ungefähr 30 Minuten bis sie sich stabilisiert haben. Bis auf die ND-Filter 0,1 % und 0,01 % wurde der Einfluss aller Leistungssprünge auf die mechanische Spannung im Silizium untersucht, da hier die Laserleistung zu stark abnimmt. Bei jedem Leistungssprung wurden die Siliziumpeak-Position und die Neonpeak-Position über drei Stunden gemessen. Jede dieser Messungen wurde insgesamt fünfmal wiederholt, um sicher zu stellen, dass die gemessenen Effekte kein Zufall, sondern statistisch belegbar sind. Die Differenz beider Peak-Positionen wurde anschließend mit der Differenz von Neon und Silizium für nicht verspanntes Silizium verglichen. Da auch beim kleinsten verwendeten ND-Filter (1

%) noch ein vernünftiges Signal-Rausch-Verhältnis für die Auswertung benötigt wird, wurde bei allen Versuchen eine konstante Akquisitionszeit von zwei mal drei Sekunden gewählt.

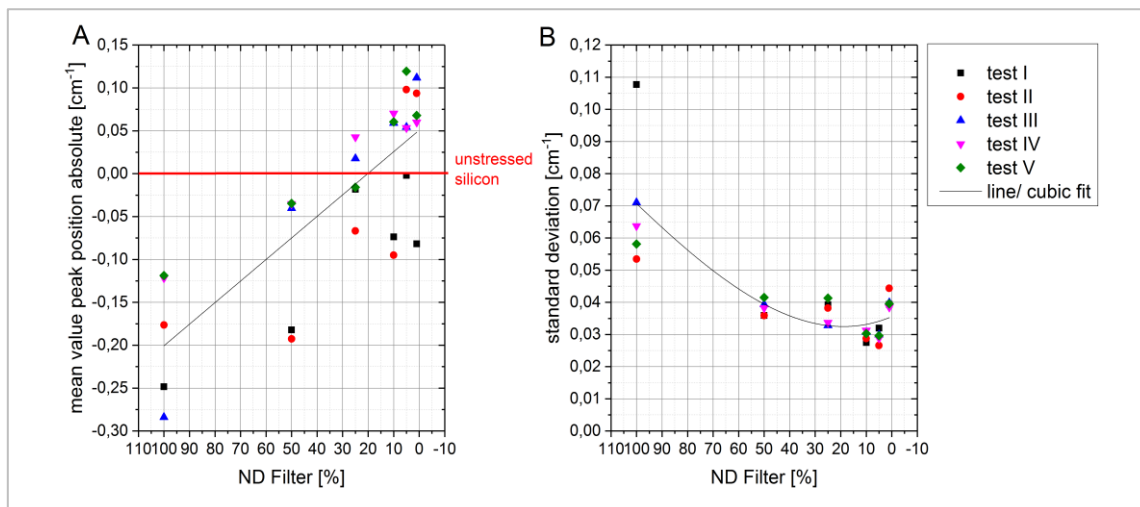


Abbildung 28: Mittelwert (A) und Standardabweichung (B) des Mittelwerts über die drei Stunden bei den jeweiligen Leistungssprüngen (ND-Filter)

Die Ergebnisse aus Abbildung 28 zeigen die reinen resultierenden Peak-Verschiebungen. Betrachtet man zunächst den Graphen A, so erkennt man, dass sich die Peak-Position von Silizium mit zunehmender Laserleistung (größer werdender ND-Filter) in Richtung kleinerer Wellenzahlen bewegt (negative Peak-Verschiebung). Erst mit kleiner werdender Laserleistung nimmt die Peak-Verschiebung ab und der Siliziumpeak verschiebt sich in Richtung größerer Wellenzahlen (positive Peak-Verschiebung). Ab einen ND-Filter von 25 % sind die berechneten Peak-Verschiebungen um den Wellenzahlenbereich für nicht verspanntes Silizium gleich verteilt. Das bedeutet, dass sich die Mittelwerte der Peak-Verschiebung der fünf durchgeführten Messungen, wie aus Abbildung 28 (A) hervorgeht, um Null bewegen. Daraus folgt, dass zu hohe Laserleistungen zu einer Peak-Verschiebung basierend auf den Eintrag von thermischer Energie führen, da sich die Probe lokal aufheizt. Außerdem ist in dem Graph zu erkennen, dass die Messungen mit einem ND-Filter von 25 % am nächsten an dem Referenzwert (0 cm^{-1}) für nicht verspanntes Silizium liegen.

In Abbildung 28 (B) sind die Standardabweichungen der einzelnen Messungen dargestellt. Aus dem Graph geht hervor, dass bei kleiner werdenden ND-Filtern die Standardabweichung zunächst abnimmt und ab einem ND-Filter von 10 % wieder zunimmt. Die erneute Zunahme der Standardabweichung lässt sich dadurch erklären, dass durch das Senken der Laserleistung

über den ND-Filter das Signal-Rausch-Verhältnis schlechter wird und demzufolge das Peak-Fitting ungenauer wird. Die kleinste Standardabweichung liegt bei einem ND-Filter von 10 %.

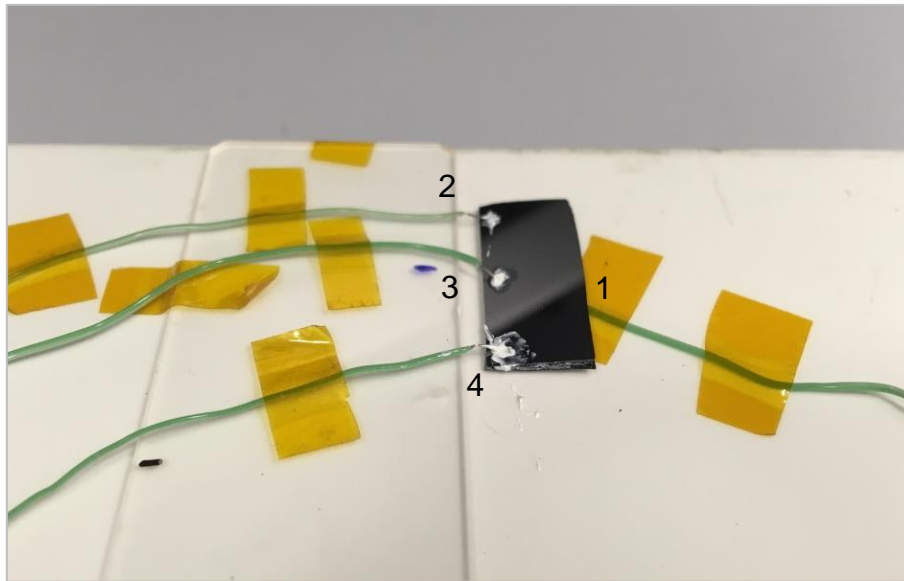


Abbildung 29: Messaufbau zur Bestimmung des möglichen Temperatureintrags durch den Laser

Die Hypothese des lokalen Temperatureintrags durch hohe Laserleistung sollte anschließend durch ein Folgeexperiment mit fünf Thermoelementen näher untersucht werden und klären, ob sich die Probe durch den Laser tatsächlich erwärmt. Hierzu wurden drei der fünf Thermoelemente oben auf einem Siliziumchip und eines unterhalb des Chips auf der Rückseite angebracht. Die drei Thermoelemente wurden dabei in der Mitte und an den Rändern ober- und unterhalb des Laserspots mit Wärmeleitpaste befestigt. Das fünfte Thermoelement diente zur Messung der Temperatur in der Kammer. Der Siliziumchip wurde wiederum auf eine Keramikplatte gelegt, um die Wärmeleitung durch Untergrund zu verringern (Abbildung 29).

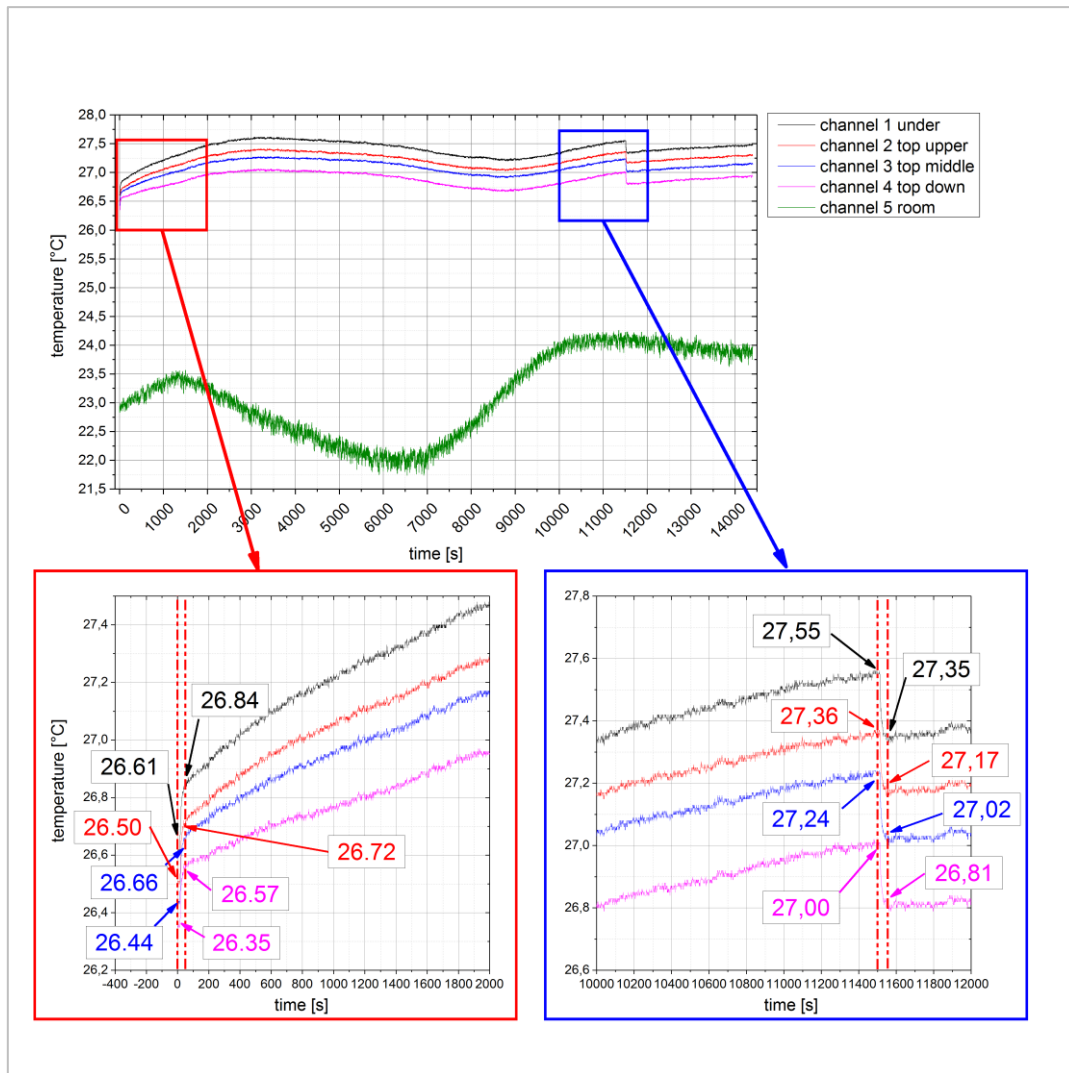


Abbildung 30: Ergebnisse der Temperaturmessungen der verschiedenen Thermoelemente

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse der Temperaturmessungen der fünf Thermoelemente zu sehen. Die oberen vier Kurvenverläufe zeigen die komplette Temperaturmessung aller vier Thermoelemente in der Kammer über die vier Stunden. Der untere Graph stellt die Temperatur im Raum dar. Der Vergleich der Temperaturen zeigt, dass die Temperaturen auf der Probe um 3,5 °C höher sind als die Temperatur im Raum. Die höhere Temperatur auf dem Siliziumchip kann demzufolge nicht vom Laser kommen, da die Temperaturdifferenz auch dann vorhanden ist, wenn der Laser nicht im Betrieb ist. Vermutlich erzeugt die Neon-Plasma-Quelle und der Motor des Z-Triebes die zusätzliche Wärme, welche durch den geschlossenen Probenraum aufgrund des Laserschutzes nicht abgeführt werden kann. Darüber hinaus zeigen die Temperaturen auf dem Siliziumchip einen ähnlichen Verlauf wie die Temperatur im Raum.

Dabei ist der Temperaturverlauf der vier Thermoelemente im Vergleich zum Temperaturverlauf im Raum um eine Stunde verzögert.

Lediglich zu Beginn (roter Rahmen) und am Ende (blauer Rahmen) zeigt sich der Einfluss des Lasers. Sobald der Laser eingeschaltet wird, steigt die Temperatur ober- und unterhalb des Siliziumchips innerhalb von 15 Sekunden um $0,2\text{ °C}$. Ähnliches passiert beim Abschalten des Lasers. Dort sinkt die Temperatur wieder um $0,2\text{ °C}$ innerhalb von 35 Sekunden. Allerdings wird deutlich, dass das Aufheizen der Probe über drei Stunden aus dem ersten Experiment (Abbildung 28) mit diesem Messaufbau nicht nachgewiesen werden kann. Scheinbar hat der thermische Einfluss des Lasers auf die Probe eine so geringe räumliche Ausdehnung, dass die Thermoelemente zu weit vom Einflussbereich des Lasers entfernt waren. Die anschließend durchgeführten Messungen mit kleineren Siliziumchips, bei welchen die Thermoelemente näher am Laserspot positioniert wurden, zeigten jedoch auch keinen deutlich messbaren Einfluss.

Einfluss der Messzeit (Acquisition Time)

Ebenso wie beim Experiment zuvor, sind auch hier alle Messungen auf einem nicht verspannten Siliziumchip und nach 30-minütiger Aufwärmzeit für die Laser- und Neon-Plasma-Quelle durchgeführt worden. Resultierend aus den vorherigen Untersuchungen mit unterschiedlicher Laserleistung, wurde ein ND-Filter von 25 % als optimale Laserleistung für dieses Experiment gewählt.

Mit dieser Laserleistung wurden erneut der Neon- und der Siliziumpeak über drei Stunden gemessen und insgesamt sieben Messungen bei den unterschiedlichen Messzeiten durchgeführt. In Abbildung 31 (A) sind die Mittelwerte aus den drei Stunden-Messungen dargestellt. Diese sind wiederum die Differenz aus dem Neon- und Siliziumpeak, verglichen mit dem Mittelwert der Differenz zwischen den beiden Peaks aus der 24 h-Messung. Die Abbildung 31 (B) zeigt die Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Messzeit. Die Messzeiten wurden von $2 \times 30\text{ s}$ bis $2 \times 1\text{ s}$ variiert und jeweils doppelt durchgeführt. Anschließend wurde der Mittelwert gebildet, um sogenannte „Spikes“ (sehr schmale Peaks), welche häufig durch Myonen (Teilchen der kosmischen Strahlung) erzeugt werden und Artefakte darstellen, heraus zu mitteln.

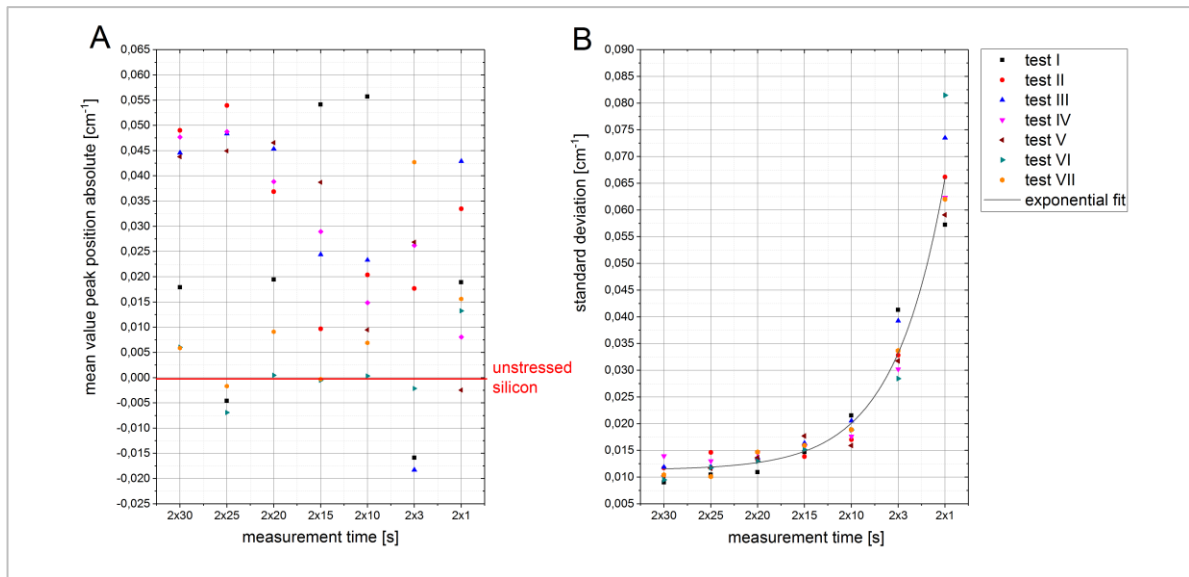


Abbildung 31: Mittelwert (A) und Standardabweichung des Mittelwerts (B) über drei Stunden bei unterschiedlichen Messzeiten

Die Mittelwerte der jeweiligen Messungen in Abbildung 31 (A) lassen keine eindeutige Tendenz erkennen, da die Schwankung der einzelnen Mittelwerte zu groß ist. Der Graph der Standardabweichung in Abbildung 31 (B) zeigt hingegen eine eindeutige Tendenz. Die Standardabweichung nimmt mit sinkender Messzeit exponentiell zu, was wiederum bedeutet, dass sie bei Messzeiten kleiner gleich 2×10 s stark zunimmt. Bei größer werdenden Messzeiten wird wiederum deutlich, dass sich die Standardabweichung einer horizontalen Asymptote bei ungefähr $0,01 \text{ cm}^{-1}$ annähert. Demzufolge nimmt die Standardabweichung selbst bei Messzeiten größer 2×30 s nicht weiter ab und hat somit dort ihr Minimum. Da ein Mapping mit nur 100 Messpunkten bei dieser Messzeit 100 Minuten und somit extrem lange dauern würde, wurde als Kompromiss eine kürzere Messzeit von 2×10 s bei einer dennoch geringen Standardabweichung von $0,020 \text{ cm}^{-1}$ gewählt. Mit diesen Parametern verkürzt sich die Gesamtmesszeit auf ein Drittel und beträgt nur noch 33 Minuten.

3.2.4. Wahl der Messparameter

Die Bestimmung der Informationstiefe an dem Siliziumkeil hat in vier Versuchsreihen eine mittlere Informationstiefe von 0,99 μm ergeben.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Experimente und deren Ergebnisse wird die Laserleistung für die Spannungsmessungen auf 25 % reduziert und eine Messzeit von 2×10^4 s gewählt. Dadurch fällt zum einen der thermische Eintrag in die Probe durch den Laser nicht so groß aus, so dass sich der Siliziumpeak nicht verschiebt. Zum anderen erhält man ein stabiles Siliziumsignal über mehrere Stunden hinweg, welches eine sehr geringe Standardabweichung besitzt.

Vor jeder Spannungsmessung oder Messreihe wird die sogenannte „Autocalibration“-Routine durchgeführt, da nur so gewährleistet werden kann, dass das Gitter und die damit verbundene Skaleneinteilung stimmt.

Zusätzlich sollte vor jeder Spannungsmessung der Abstand von Neon und Silizium mit den unten gewählten Parametern auf dem Referenz-Siliziumchip bestimmt und mit der Referenzmessung (24 h-Messung) verglichen werden. Aus dieser 24 h-Messung wird später der Abstand für das nicht verspannte Silizium verwendet, um die absolute Peak-Verschiebung der Messung zu bestimmen. Sollte der gemessene Abstand nicht mit dem Abstand der Referenzmessung übereinstimmen, dann ist eine Neukalibrierung der Laserwellenlänge notwendig. Sollen mehrere Proben, welche hintereinander gemessen wurden, miteinander verglichen werden, ist es nicht nötig vor jeder Probe den Abstand vom Neon- und Siliziumpeak zu überprüfen.

In den meisten Experimenten soll die mechanische Spannung an der Oberfläche von Substraten bestimmt werden. Um sicherzustellen, dass immer das gleiche Probenvolumen angeregt wird, wird stets der Autofokus verwendet.

Aus den Untersuchungen des Einflusses der verschiedenen „Hole“-Öffnungen bei unterschiedlichen Z-Positionen geht hervor, dass das Maximum der Intensität bei Messungen, bei denen auf die Probenoberfläche ($z=0$) fokussiert wird, bei einer „Hole“-Öffnung von 100 μm erreicht wird. Aus diesem Grund werden die Messungen an der Oberfläche mit einer „Hole“-Öffnung von 100 μm durchgeführt.

Tabelle 8: Übersicht der experimentell bestimmten optimalen Messparameter für die Spannungsmessungen im Silizium

Parameter	Value
Acquisition Time [s]	2x10
ND-Filter [%]	25
Hole size [μm]	100
Autofocus	ON
Grating [l/mm]	1800
Mean value information depth [μm]	0,99

Zusätzlich zu den experimentell bestimmten Messparametern (Tabelle 8) wurde festgelegt, dass vor jeder Spannungsmessung zunächst die in der Software integrierte „Autocalibration“-Routine auf der vom Gerätehersteller mitgelieferten nicht verspannten Siliziumprobe durchgeführt wird. Dies sollte jedoch nur einmal vor einer Messreihe und nicht vor jeder einzelnen Messung gemacht werden, da die Gitterstellung durch die „Autocalibration“ verändert wird und die Messergebnisse somit nicht mehr vergleichbar wären.

Zusätzlich wird die Intensität des Siliziumpeaks bei den folgenden Parametern bestimmt (Tabelle 9):

Tabelle 9: Übersicht der Messparameter für die Validierung der Intensität des Siliziumpeaks

Parameter	Value
Acquisition Time [s]	2x1
ND-Filter [%]	100
Hole size [μm]	100
Autofocus	ON
Grating [l/mm]	1800

Die Amplitude des Siliziumpeaks wird als Maß für die Laserleistung gewertet, da das Messen der Laserleistung mittels Laser-Power-Meter zu zeitaufwändig wäre. Im Anschluss daran wird die Peak-Position des Siliziumpeaks überprüft. Hierzu wird der Siliziumpeak zusammen mit einem Neonpeak in der Nähe des Siliziumpeaks mit folgenden Parametern (Tabelle 10) gemessen:

Tabelle 10: Übersicht der Messparameter für die Validierung der Peak-Position des Silizium- und Neonpeaks

Parameter	Value
Acquisition Time [s]	2x10
ND-Filter [%]	25
Hole size [μm]	100
Autofocus	ON
Grating [l/mm]	1800

Die Peak-Position des Neonpeaks liegt ungefähr bei 277 cm^{-1} . Aus den beiden Peak-Positionen wird der Abstand bestimmt und mit dem Mittelwert der zuletzt durchgeführten 24 h-Messung verglichen. Liegt der Abstand der beiden Peaks der aktuellen Messung innerhalb eines Bereichs, der sich aus der dreifachen Standardabweichung um den Mittelwert herum, errechnet, kann mit der Spannungsmessung fortgefahren werden. Liegt der errechnete Abstand jedoch außerhalb der dreifachen Standardabweichung, muss davon ausgegangen werden, dass sich die Wellenlänge des Lasers verändert hat. Das hat zur Folge, dass die 24 h-Messung, aus welcher der Abstandswert des Neon- und Siliziumpeaks für nicht verspanntes Silizium bestimmt wird und welcher als Referenzwert verwendet wird, nicht mehr gültig ist. Demnach muss die Laserwellenlänge überprüft und gegebenenfalls der neue Wert in der Software hinterlegt werden. Danach kann aus einer erneuten 24 h-Messung ein neuer Referenzwert für das nicht verspannte Silizium inklusive Standardabweichung bestimmt werden.

Die Werte jeder Intensitäts- und Peaks-Positionsmessung werden in einem Excel-Template eingetragen und dienen der Dokumentation.

3.3. Ergebnisse der Raman-Messungen

3.3.1. Einfluss der Probenpräparation

Nachdem die optimalen Parameter für die Raman-Messungen experimentell bestimmt worden sind, wurde als nächster Schritt der Einfluss typischer Präparationsverfahren auf die intrinsische Spannung analysiert. Die ausgewählten Präparationsverfahren werden in Betracht gezogen, später einen fertig aufgebauten Chip so zu präparieren, dass es möglich ist, die Spannungen mittels Raman-Spektrometer zu bestimmen. Hierzu wurden der mechanische Schleifprozess und das Xe-Plasma Focus Ion Beam (FIB) TESCAN FERA 3 untersucht. Alle Untersuchungen wurden auf einem reinen nicht verspannten Siliziumchip durchgeführt. Vor jedem Experiment wurde die Bruchkante eines Siliziumchips mittels Raman-Spektrometer gemessen. Dieser Wert wurde anschließend mit der 24 h-Messung auf dem Referenz-Siliziumchip verglichen und wiederum als Referenz für die nächsten Messungen verwendet.

Präparationsverfahren: mechanischer Schleifprozess

Beim mechanischen Schleifprozess (Struers Tegramin-25) werden typischerweise drei verschiedene Siliziumcarbid-Schleifpapiere mit unterschiedlicher Körnung verwendet. Dabei variiert die Korngröße der unterschiedlichen Schleifpapiere von 30 μm (500er), über 15 μm (1200er) bis hin zu 8 μm (2400er). Als finaler Schritt wurde die zuvor geschliffene Kante mit einem Ionenpolierschritt (Gatan Model 683 MET-ETCH) bearbeitet. Nach jedem einzelnen Prozessschritt wurde der Querschnitt über die gesamte Chipdicke mit dem Raman-Spektrometer gemessen. Die mittels Raman analysierte Fläche hatte damit eine Größe von 20 μm auf 650 μm . Die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Schritten des mechanischen Schleifprozesses werden in den folgenden Abbildungen 32 und 33 dargestellt.

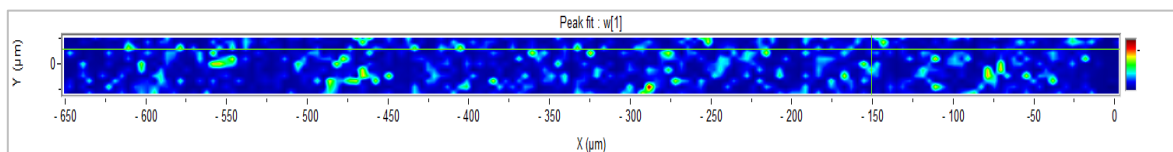


Abbildung 32: Farbliche Darstellung der unterschiedlichen Peak-Breite in dem Messbereich aus der "LabSpec"-Software (Schleifprozess mit 30 μm Korngröße)

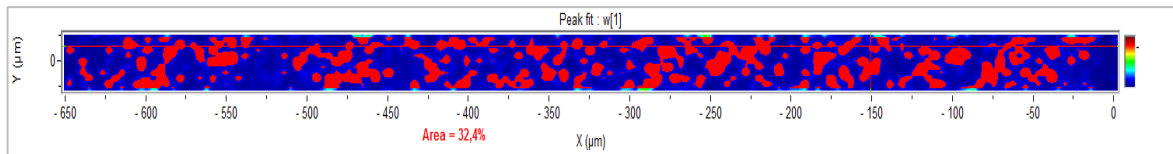


Abbildung 33: Umfärben aller nicht dunkelblauen Flächen für die Flächenanteilmessung in der „Piced“-Software (Schleifprozess mit 30 µm Korngröße)

Die Graphen zeigen zum einen den Mittelwert der Peak-Verschiebung von Silizium inklusive der Standardabweichung über die gesamte gemessene Fläche (Abbildung 32) und zum anderen den Flächenanteil des amorphen Siliziums bezogen auf die gesamte Messfläche (Abbildung 33). Der Flächenanteil wurde mit Hilfe der optischen Auswertesoftware „Piced“ berechnet. Zuvor wurde mit Hilfe der Raman-Software „LabSpec“ die Peak-Breite des Siliziums farblich kodiert dargestellt (Iqbal, et al., 1981). Begonnen wurde dabei mit der Farbe dunkelblau für die Standardpeak-Breite von monokristallinem Silizium von ungefähr $3\text{-}4\text{ cm}^{-1}$ bis hin zur Farbe rot mit einer Peak-Breite von 80 cm^{-1} . Mit Hilfe der „Piced“-Software wurden dann alle Bereiche rot markiert, die eine größere Peak-Breite als monokristallines Silizium besitzen.

Die folgende Abbildung 34 zeigt, dass durch den Schleifprozess, beispielhaft für eine Korngröße von $30\text{ }\mu\text{m}$, eine sehr große Spannung ins Silizium eingebracht wurde. Der Siliziumpeak verschiebt sich hierbei im Mittel um fast 60 cm^{-1} . Die hohe Standardabweichung ist ein Indiz für die Inhomogenität der Oberfläche nach diesem mechanischen Schleifprozessschritt. Aufgrund des hohen Spannungseintrags wurden Gitterdefekte wie beispielsweise Versetzungen oder Fehlstellen erzeugt, die zu Veränderungen der Kristallstruktur im Silizium und somit zu einer Veränderung der Kristallitgröße führen. Der Flächenanteil des amorphen Siliziums beträgt hier über 32 % (Abbildung 35).

Der zweite Schleifschritt mit einer feineren Korngröße von $15\text{ }\mu\text{m}$ führte im Vergleich zum ersten Schritt mit $30\text{ }\mu\text{m}$ zu einer kleiner werdenden Peak-Verschiebung. Auch der Flächenanteil des amorphen Siliziums verringerte sich. Der Grund dafür ist zum einen der Abtrag der durch den ersten Schleifschritt stark verspannten und amorphen Fläche. Zum anderen wird der Spannungseintrag in das Silizium durch das Schleifen mit einem feineren Schleifpapier, im Vergleich zum Schleifen mit $30\text{ }\mu\text{m}$ Korngröße, kleiner. Der Flächenanteil des Siliziums mit größeren Kristallen sinkt auf knapp über 40 % und die Standardabweichung mit $1,6\text{ cm}^{-1}$ ist nur minimal kleiner. Die Messfläche ist demnach nach wie vor sehr inhomogen.

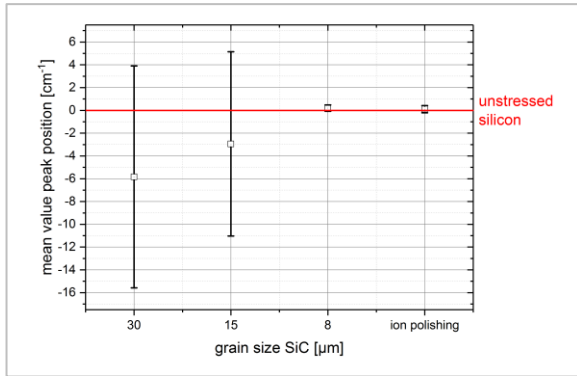


Abbildung 34: Mittelwert und Standardabweichung der Raman-Verschiebung der kompletten Messfläche

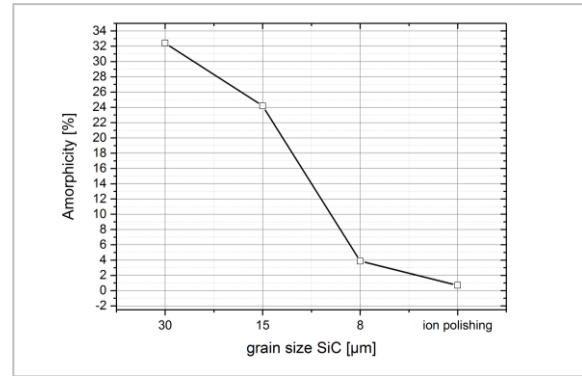


Abbildung 35: Flächenanteil der größeren Kristallite (amorphe Bereiche) der kompletten Messfläche

Im nächste Schleifschritt mit 8µm Korngröße steigt die Homogenität der geschliffenen Siliziumoberfläche, da die Standardabweichung auf $0,27 \text{ cm}^{-1}$ sinkt (Abbildung 34). Der Mittelwert der Peak-Verschiebung verringert sich um $2,2 \text{ cm}^{-1}$ auf $0,2 \text{ cm}^{-1}$. Aus Abbildung 35 geht hervor, dass der Flächenanteil des amorphen Siliziums nach dem dritten Schleifschritt auf 3,86 % fällt. Es sind nur noch sehr kleine Bereiche mit größeren Kristalliten zu erkennen und die maximale Peak-Breite liegt bei $w=9,9 \text{ cm}^{-1}$. Um den übrig gebliebenen Anteil der größeren Kristalle nochmals zu reduzieren, wurde die Probe mittels Ionenpolieren final bearbeitet. Das Ergebnis bestätigte die Wirkung des Ionenpolierschritts deutlich, denn der Flächenanteil sank auf 0,69 % mit einer maximalen Peak-Breite von $w=5,9 \text{ cm}^{-1}$. Lediglich sehr tiefe Kratzer auf der Probe, welche durch den ersten Schleifschritt entstanden sind, zeigen einen gestörten Siliziumkristall (rot markierte Bereiche in Abbildung 36). Auch der Mittelwert der Peak-Verschiebung reduziert sich nach dem Ionenpolieren von $0,2 \text{ cm}^{-1}$ auf $0,1 \text{ cm}^{-1}$.

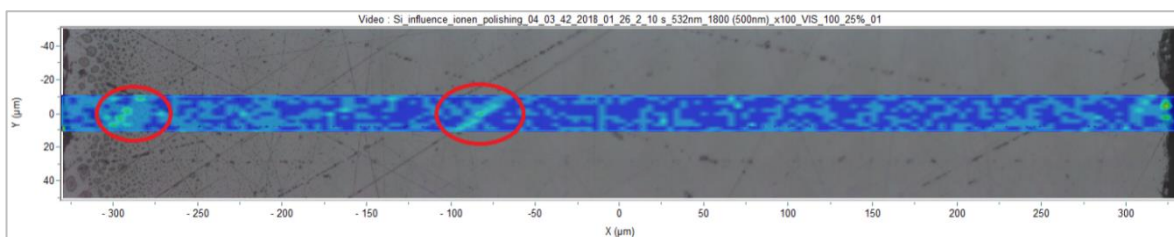


Abbildung 36: Farblich kodierte Darstellung der Peak-Breite überlagert mit dem Videobild nach dem Ionenpolierschritt

Zusammenfassend zeigen die Abbildungen 34 und 35, dass es möglich ist, mittels Schleifen eine Zielpräparation durchzuführen und nach dem kompletten Schleifvorgang (Schleifpapier mit 30 µm Körnung bis hin zum Ionenpolieren), die durch das Schleifen eingebrachte intrinsische Spannung auf das Niveau einer nicht verspannten Siliziumprobe zu reduzieren.

Präparationsverfahren: Xe-Plasma Focus Ion Beam (FIB)

Das Xe-Plasma-FIB ist ein Präparationsverfahren, welches aufgrund des höheren Zeitaufwands im Vergleich zum mechanischen Schleifen eher zum Entfernen von kleinen Volumina gedacht ist. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss des Xe-Plasma-FIBs auf die intrinsische mechanische Spannung im Silizium zu untersuchen. Einer der wichtigsten einzustellenden Parameter ist der Strahlstrom, welcher dazu verwendet wird, die Abtragsrate vom Material zu variieren. Daher wurde in erster Linie untersucht, welchen Einfluss die Änderung des Strahlstroms auf die intrinsische Spannung im Silizium hat. Eine Änderung des Strahlstroms bringt automatisch auch eine Änderung des Ionenstrahldurchmessers mit sich. Die Abstufungen des Strahlstroms wurden dabei so gewählt, dass der komplette Einstellbereich abgedeckt wurde. Aus der folgenden Tabelle 11 geht hervor, dass es eine kleine Differenz zwischen dem eingestellten Strahlstrom (2. Spalte) und dem gemessenen Strahlstrom (3. Spalte) gibt.

Tabelle 11: Übersicht der Parameter am Xe-Plasma-FIB

Step No.	Beam Current Set [nA]	Beam Current Measured [nA]	Beam Diameter [µm]	Beam Diameter Polishing [µm]	Beam Energy Xe [keV]
1	1000	964,48	18	10	30
2	300	267,45	14	8	30
3	100	113,05	11	6	30
4	30	23,54	5	4	30
5	10	9,65	2	2	30

In den nachfolgenden Abbildungen 37 und 38 sind die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen nach dem FIB-Schliff mit den unterschiedlichen Parametern zu sehen. Das treppenähnliche Aussehen der Probe kommt dadurch zustande, dass versucht wurde, lediglich eine einzige Probe zu erstellen, auf der die unterschiedlichen Oberflächen mit den verschiedenen

Strahlströmen ersichtlich werden. Dies vereinfacht die späteren Raman-Messungen, da weder ein Probenwechsel stattfinden muss, noch der Verfahrenweg zur nächsten Oberfläche besonders groß ist. Der Nachteil dieser Anordnung wurde jedoch beim Betrachten des fertigen Schliffs im Rasterelektronenmikroskop deutlich. Bei jedem FIB-Schritt lagern sich Partikel der abgetragenen Oberfläche auf der umliegenden Fläche ab. Diese Rückstände verfälschen oder erschweren die Raman-Messungen. Dadurch war es notwendig, einen zusätzlichen Polierschritt auf jeder Ebene durchzuführen. Dabei wurden die entsprechenden Ebenen mit dem jeweiligen Strahlstrom jedoch mit verringertem Strahldurchmesser (Tabelle 11) erneut bearbeitet.

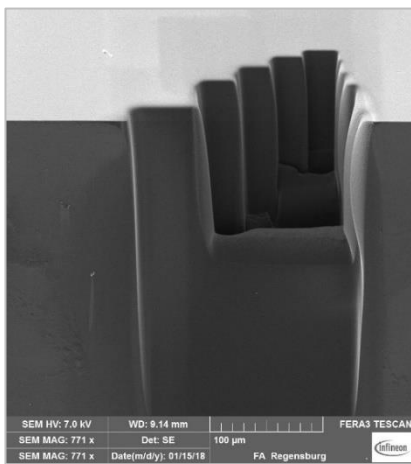


Abbildung 37: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des treppenähnlichen FIB-Schliffs erstellt mit unterschiedlichen Strahlströmen (Frontansicht)

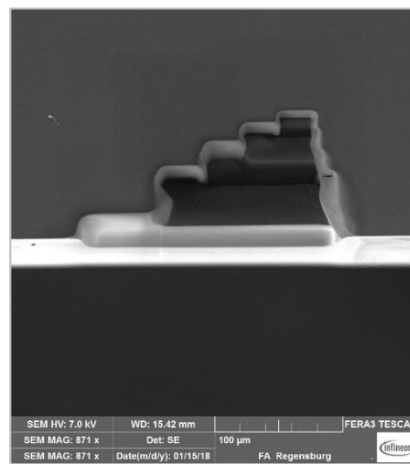


Abbildung 38: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des treppenähnlichen FIB-Schliffs erstellt mit unterschiedlichen Strahlströmen (Draufsicht)

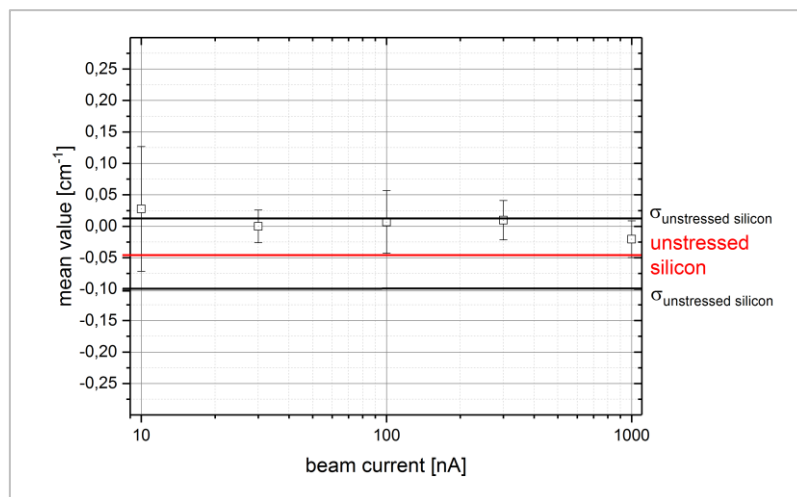


Abbildung 39: Mittelwerte mit Standardabweichungen der Messflächen auf den jeweiligen FIB-Schliffebenen; die rote durchgezogene Linie zeigt den Mittelwert auf dem Siliziumquerschliff mit der Standardabweichung (schwarze Linien) vor dem FIB-Schliff

In Abbildung 39 sieht man die Mittelwerte der jeweiligen FIB-Schliffebene und die dazu gehörige Standardabweichung. Die X-Achse wurde dabei logarithmisch eingeteilt, da sonst die einzelnen Strahlströme nicht gut dargestellt werden können. Man erkennt im Graphen, dass alle Mittelwerte, abgesehen von einem Wert, innerhalb der Standardabweichung der Messungen auf der Bruchkante vor dem FIB-Schliff liegen. Der einzige Wert der außerhalb liegt, ist der Mittelwert der Ebene, welche mit 10 nA erzeugt wurde. Da hier jedoch auch die Standardabweichung selbst am Höchsten ist, liegen die Werte in diesem Messbereich innerhalb der Standardabweichung der Referenzmessung. Der hohe Wert der Standardabweichung ist auch hier ein Zeichen für die hohe Inhomogenität der Messfläche.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass der Einfluss des Strahlstroms und des Strahldurchmessers des verwendeten Xe-Plasma-FIBs auf die intrinsische Spannung im Silizium unterhalb der Nachweißgrenze des verwendeten Raman-Spektrometers liegt. Während der Messungen wurde zusätzlich festgestellt, dass es immer schwieriger wurde die unterschiedlichen Flächen, welche mit verschiedenen Strahlströmen erzeugt wurden, bei zunehmender Tiefe mit dem Raman-Spektrometer zu messen. Für zukünftige Messungen, zum Beispiel zur Untersuchung des Einflusses eines Ga-Plasma-FIBs, werden die einzelnen FIB-Schliffebenen größer gewählt. Allerdings steigt dadurch auch der Zeitaufwand für jeden einzelnen Schritt. Wie (Pastewka, et al., 2009) mittels Simulation in Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen zeigen, ist der Einfluss vom Ga⁺-Plasma-FIBs deutlich höher. Es wird berichtet, dass es durch die Ga⁺-Ionen zu einer Störung der Kristallstruktur (Amorphisierung) an der Oberfläche des Siliziums kommt. Mit zunehmender Anzahl von Einschlägen und somit mit Zunahme der kinetischen Energie der Ga⁺-Ionen auf die Silizium Oberfläche, nimmt die Schichtdicke des amorphen Siliziums zu.

3.3.2. Prozessbegleitender Aufbau eines Modellchips

Ein Ziel dieser Doktorarbeit war die Vergleichbarkeit der gemessenen intrinsischen Spannungen, welche mit dem piezo-resistiven Messverfahren und mit dem Raman-Spektrometer bestimmt werden sollten. Dazu wurde der Einfluss der einzelnen Prozessschritte des Modellchips auf die intrinsische Spannung mittels Raman-Spektrometer prozessbegleitend gemessen. Zu Beginn wurde bei 10 von 30 Spannungsmesschips zunächst das Imid entfernt, da die Absorption der Passivierung so groß ist, dass kein Signal mehr von der Siliziumoberfläche des Chips detektiert werden konnte. Der Einfluss des Plasmaätzverfahrens zum Entfernen von Imid wurde durch die piezo-resistive elektrische Messung überprüft. Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung sind in Kapitel 3.5.1. zu finden.

Begonnen wurde mit der Messung der Spannungsmesschips im Grundzustand. Auf jedem dieser Chips wurden jeweils drei Raman-Messungen durchgeführt. Aus diesen drei Messungen wurde anschließend der Mittelwert gebildet und die Standardabweichung bestimmt. Vor jeder Messserie wurde das Raman-Spektrometer einmal pro Aufbauschritt überprüft, um zu gewährleisten, dass die gemessenen Spannungswerte richtig sind und auch ein Vergleich zwischen den einzelnen Messserien ermöglicht werden kann. Die verwendeten Parameter für die Raman-Messungen sind die Parameter aus Kapitel 3.2.4.

Die Positionierung der Messpunkte auf den Spannungsmesschips wurde so gewählt, dass die Messzeit möglichst gering ist und man dennoch genügend Informationen über die intrinsische Spannung von der Chipoberfläche erhält. Dazu wurde testweise auf einem Chip ein hochaufgelöstes Mapping mit 176 Messpunkten in X-Richtung und 114 Punkten in Y-Richtung durchgeführt. Die Schrittweite betrug in beiden Koordinatenrichtungen 16 μm . Die daraus resultierende Messzeit betrug 30,5 h. Bei dieser Messung wurde die Amplitude des Siliziumpeaks an den einzelnen Messpunkten gefittet und auf die Amplitude des Neonpeaks referenziert.

Das Ergebnis des Mappings in Abbildung 40 zeigt, dass es Bereiche auf dem Chip gibt, welche einen weniger intensiven Siliziumpeak aufweisen (schwarze bis dunkelblaue Bereiche) und andere Bereiche, die sehr viel Intensität zeigen (gelbe bis rote Bereiche). Die Messpunkte für das prozessbegleitende Messen der intrinsischen Spannung wurden so gewählt, dass sie auf Bereichen liegen, die mindestens eine Intensität aus dem gelben Bereich besitzen. Ein weiteres Kriterium für die Wahl der Messpositionen waren die Positionen der Strommessspiegel, bei welchen die intrinsische Spannung mittels piezo-resistiver Messung bestimmt werden kann. An

diesen Messpositionen ist dann ein direkter Vergleich beider Messmethoden möglich. Die gewählten Positionen für die Raman-Messungen sind in Abbildung 41 markiert (weiße Punkte).

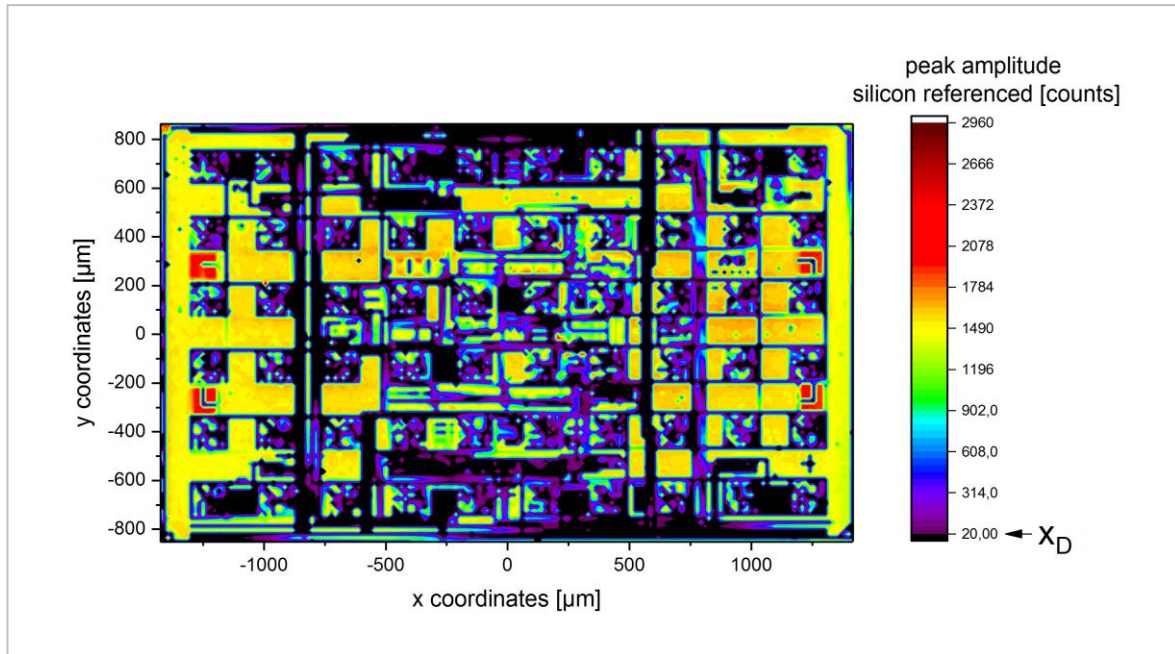


Abbildung 40: Intensitätsmapping eines Spannungsmesschips (schwarze Bereiche liegen unterhalb der Nachweißgrenze x_D)

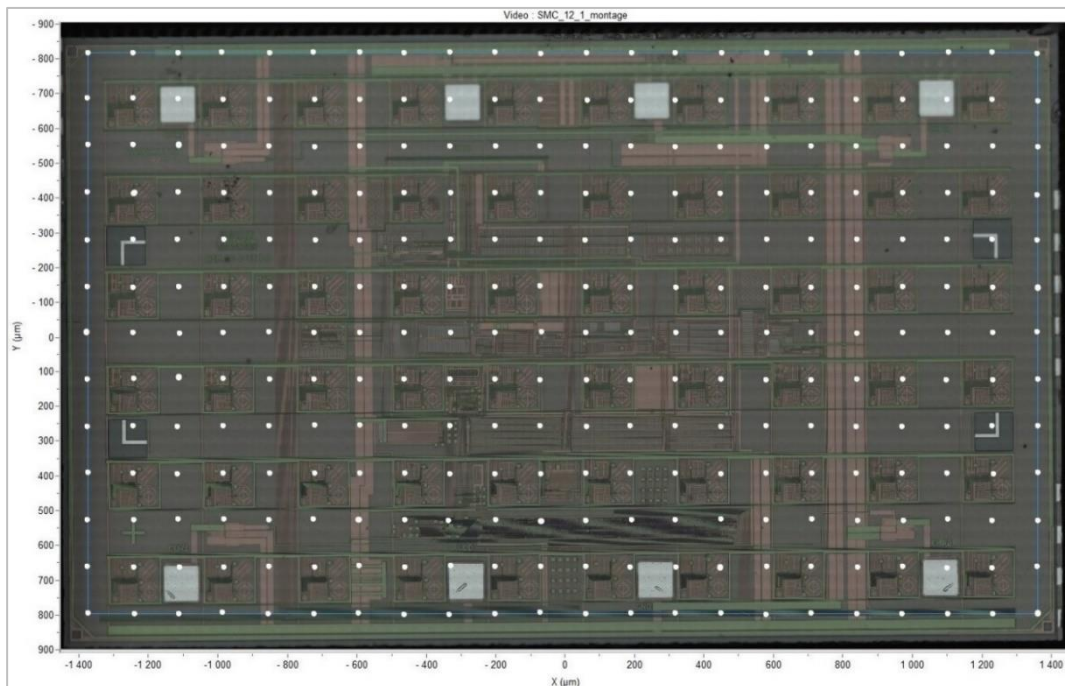


Abbildung 41: Aus dem Intensitätsmapping abgeleitete Messpositionen für die prozessbegleitende Bestimmung der intrinsischen Spannung mittels Raman-Spektrometer

Insgesamt wurde die Anzahl der Messpunkte auf 22 Positionen in X-Richtung und 13 Positionen in Y-Richtung reduziert. Dadurch vergrößert sich der Abstand zwischen zwei Punkten auf 130 μm in X-Richtung und auf 134 μm in Y-Richtung. Demzufolge reduziert sich die Messzeit somit auf knapp zwei Stunden.

Um die intrinsischen Spannungen der einzelnen Spannungsmesschips nach den jeweiligen Prozessschritten besser vergleichen zu können, wurden die gemittelten Spannungswerte aus den drei Raman-Messungen pro Chip über den gesamten Chip noch einmal gemittelt. Man erhält so also von jedem Spannungsmesschip aus jedem Prozessschritt einen Spannungswert. Abbildung 42 zeigt den Vergleich der einzelnen Mittelwerte von Chip10.1 bis Chip 12.2.

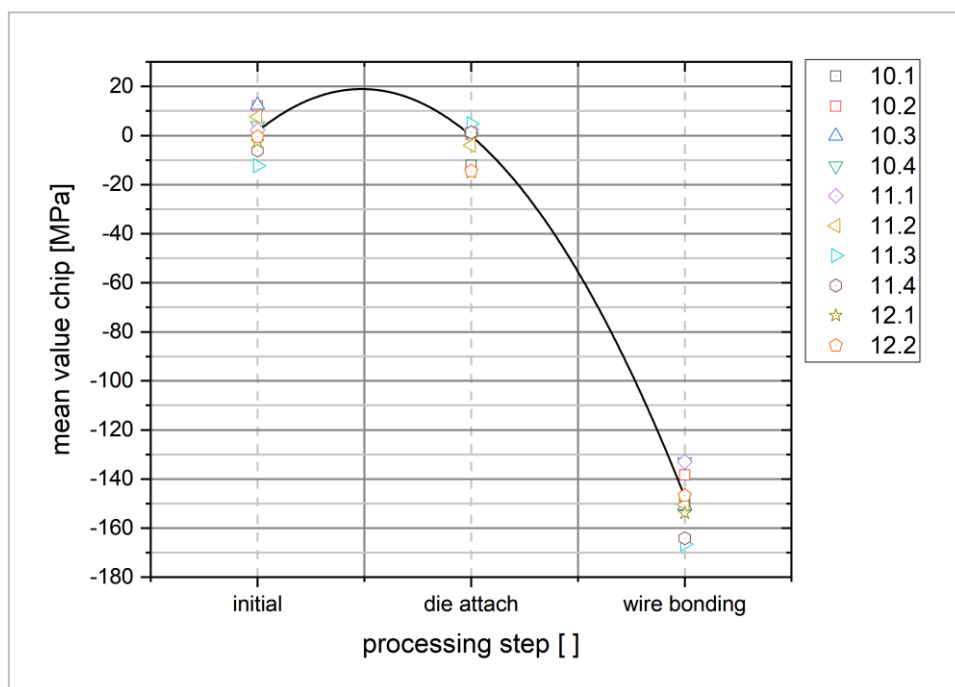


Abbildung 42: Vergleich der Mittelwerte der biaxialen Spannung der einzelnen Chips über die drei Prozessschritte

Die Abbildung 42 zeigt eine vergleichsweise geringe Schwankung der Mittelwerte der biaxialen Spannung auf den einzelnen Spannungsmesschips bei den jeweiligen Prozessschritten. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die mittlere biaxiale Spannung nach dem Die Attach-Prozess nur geringfügig ändert. Sie verschiebt sich leicht zu negativen Werten, anders hingegen sieht es nach dem Wirebond-Prozess aus. Dort verschiebt sich die mittlere biaxiale intrinsische Spannung auf den Spannungsmesschips deutlich um mehr als 150 MPa zu negativen Spannungswerten.

Als Grund für die Spannungsänderung auf den Spannungsmesschips nach dem Wirebond-Prozess kann das Erreichen der Glasübergangstemperatur T_G des Die Attach und einer damit verbundenen Spannungsrelaxation des Systems angenommen werden.

Die beiden folgenden Abbildungen 43 und 44 zeigen die Ergebnisse der Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA) und der Thermischen Mechanischen Analyse (TMA).

Während einer DMA-Messung wird die Probe dynamisch mit gewissen Frequenzen (grüne Kurven in Abbildung 43) in Zugrichtung belastet und das Kraftsignal in Abhängigkeit einer vorgegebenen Amplitude gemessen. Beides wird in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet. Aus dem Phasenunterschied beider aufgezeichneten Sinuskurven kann der Phasenwinkel δ bestimmt werden, woraus neben dem E-Modul auch das Verlust-Modul berechnet werden kann (Menard, 1999).

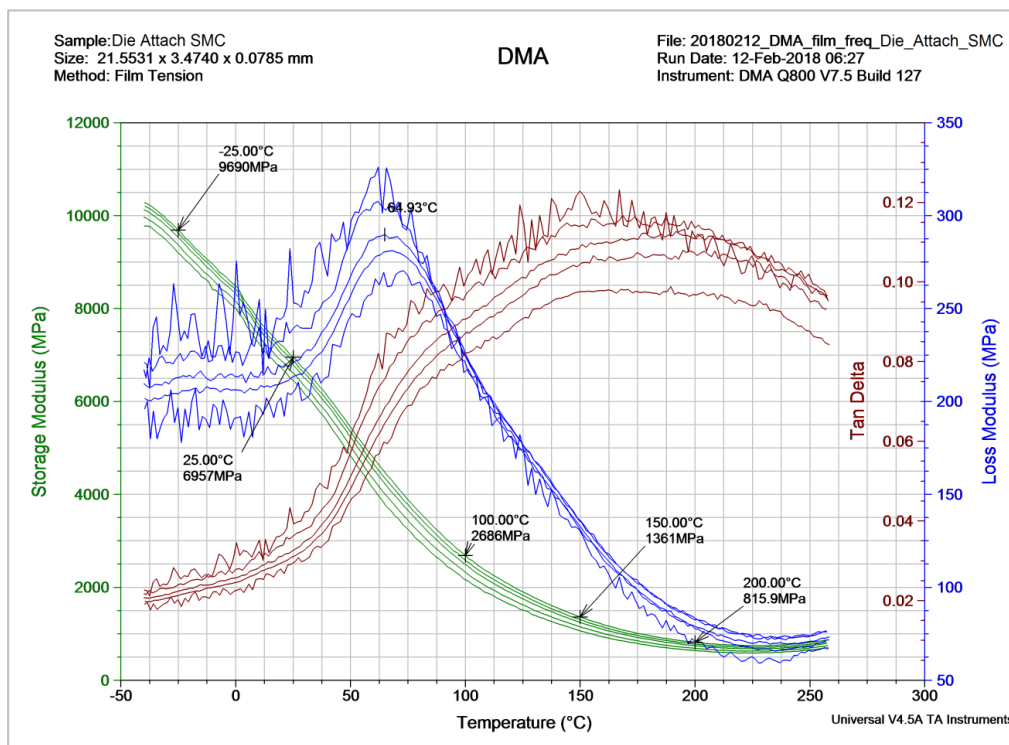


Abbildung 43: Ergebnis der DMA-Messung des verwendeten Die Attach (IFAG FE QM FA RBG 2 ETM)

Bei einer TMA-Analyse wird die thermische Ausdehnung der Probe über einen bestimmten Temperaturbereich bestimmt. Unterhalb der Glasübergangstemperatur ist der Die Attach steif und spröde (Glaszustand) (Jansen, 2006). Oberhalb dieser Temperatur nimmt die Steifigkeit ab

(elastischer Zustand). Im Temperaturbereich des Wirebond-Prozesses sinkt demnach die Steifigkeit (E-Modul oder „Storage Modulus“) im Vergleich zur Raumtemperatur (25 °C) von 7 GPa auf ungefähr 1 GPa bei 170 °C und weiter auf 0,8 GPa bei 200 °C (Abbildung 43). Zusätzlich verdoppelt sich der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE) von 66 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ unterhalb der Glasübergangstemperatur bei 80 °C auf 119 $\mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ oberhalb der Glasübergangstemperatur (Abbildung 44).

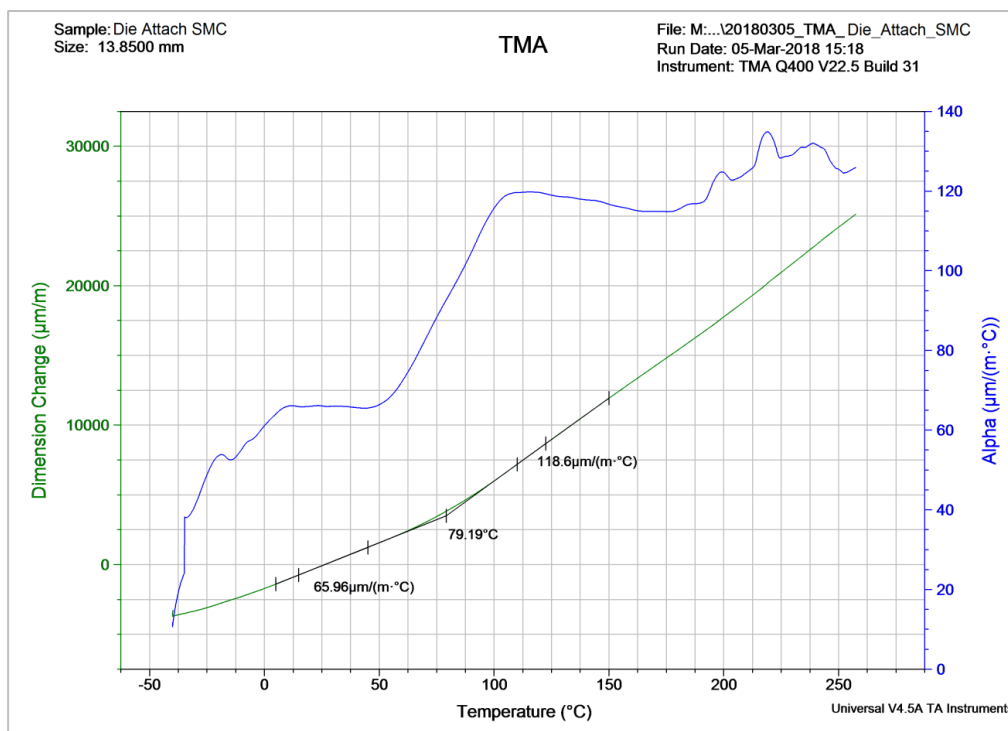


Abbildung 44: Ergebnis der TMA-Messung des verwendeten Die Attach (IFAG FE QM FA RBG 2 ETM)

Im Folgenden soll nun ein Blick auf die Spannungsverteilung eines ausgewählten Spannungsmesschips geworfen werden, welcher stellvertretend für alle zehn gemessenen Chips steht (Abbildungen 45 bis 47). Die transparenten Bereiche sind Areale, bei denen die Intensität des Siliziumpeaks unterhalb der Nachweißgrenze lag. Dadurch war keine zuverlässige Bestimmung der Peak-Position möglich.

Wie bereits beim Vergleich der Mittelwerte der Spannungen auf den einzelnen Spannungsmesschips über die Prozessschritte zu erkennen ist, zeigen auch die Abbildungen 45 bis 47 die gleiche Tendenz. Die mechanische Spannung ändert sich nach dem Die Attach nur sehr wenig (Abbildung 46).

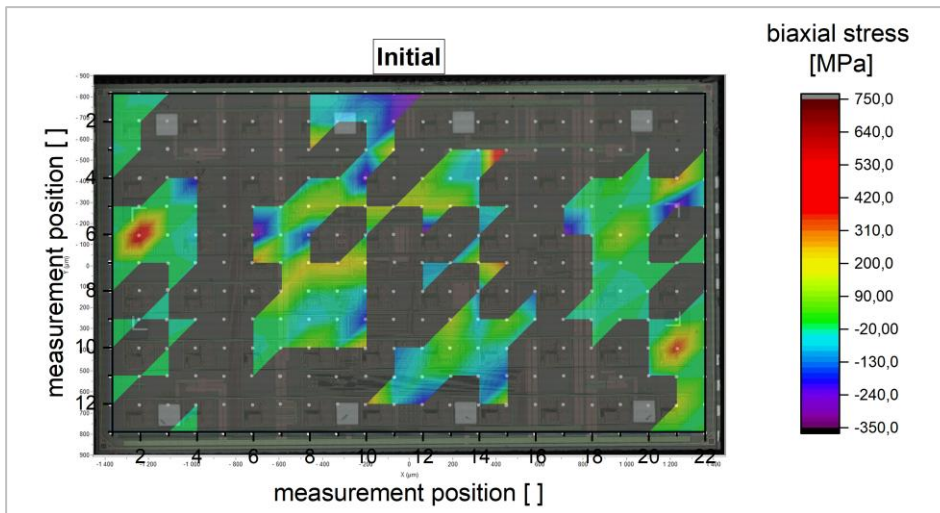


Abbildung 45: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 im Grundzustand

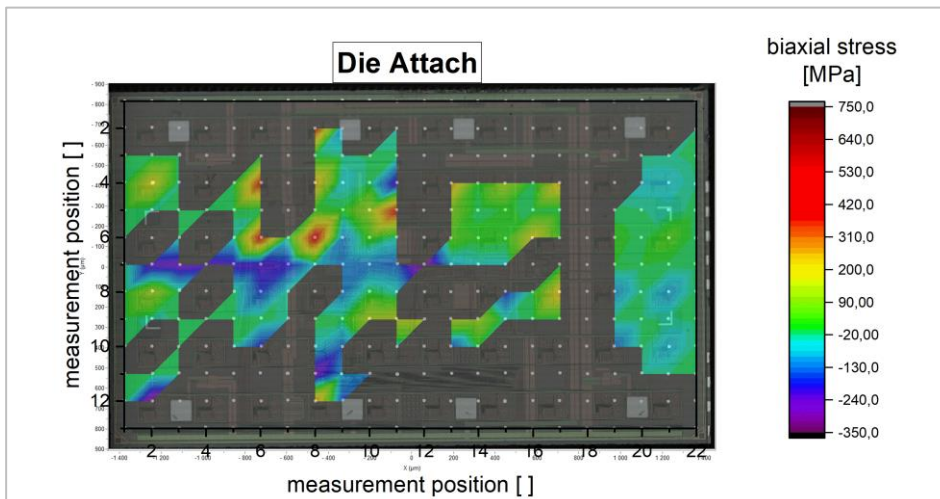


Abbildung 46: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 nach dem Die Attach

Lediglich einzelne Bereiche weisen deutlich andere Spannungswerte im roten und violetten Bereich auf. Im Grundzustand zeigt die Fläche des Spannungsmappings eine grüne bis hellblaue Färbung (-10 MPa bis -35 MPa). Im Zentrum des Spannungsmesschips steigt die mechanische Spannung auf 160 MPa bis 230 MPa an (gelbe Bereiche). Vereinzelt gibt es noch Bereiche, die unterhalb der mittleren Spannung liegen. Diese blauen Bereiche liegen sowohl am oberen als auch am unteren Rand des Chips (Abbildung 45). Im Vergleich dazu ändert sich die Spannung auf dem Chip nach dem Die Attach nur sehr geringfügig. Nach dem Die Attach ist die Oberfläche grün bis hellblau gefärbt (0 MPa bis -30 MPa). Ähnlich der Auswertung des Chips im Grundzustand, gibt es auch hier im Zentrum Bereiche, welche gelb gefärbt sind.

Lediglich die blauen bis violetten Bereiche (-120 MPa bis -190 MPa) konzentrieren sich nach dem Die Attach eher auf die Mitte des Chips (Abbildung 46).

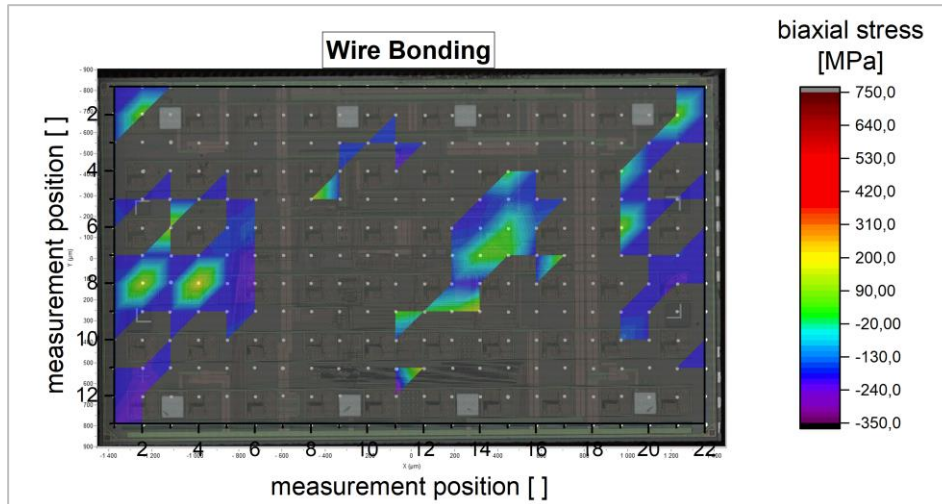


Abbildung 47: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 nach dem Wirebond-Prozess

Viel deutlicher sind hingegen die Änderungen nach dem Wirebond-Prozess. Dort weist ein Großteil der Chipoberfläche eine Spannung im blauen Bereich (-180 MPa bis -230 MPa) auf. Ein paar wenige Bereiche sind hellblau bis grün (140 MPa bis 230 MPa) oder violett (-210 MPa bis -230 MPa) gefärbt (Abbildung 47). Die wenigen Bereiche oder Flecken, welche besonders im Zentrum des Chips deutlich andere Spannungszustände zeigen als der Rest des Spannungsmesschips, stimmen bei allen Prozessschritten mit den Metallisierungen auf dem Chip überein.

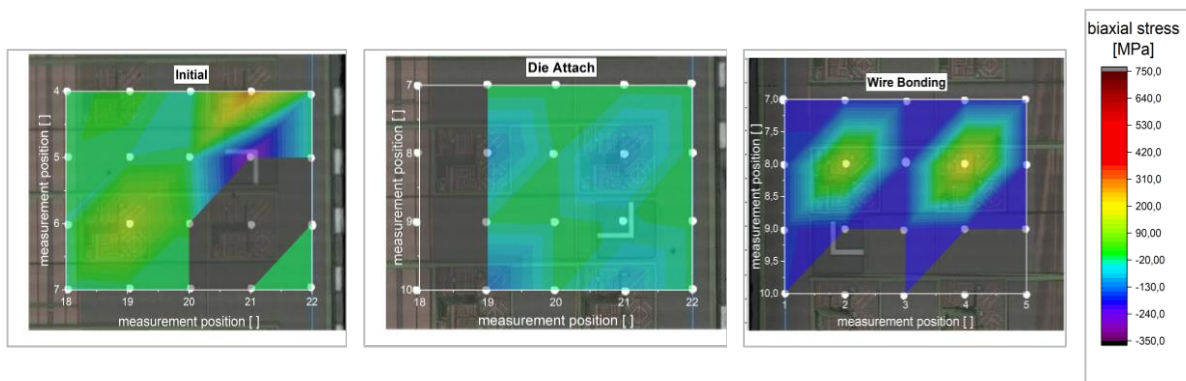


Abbildung 48: Detaillierte Darstellung der Flecken auf dem Spannungsmesschip im Grundzustand(A), nach dem Die Attach (B) und nach dem Wirebond-Prozess (C)

In den Bereichen, bei welchen die Flecken auftreten, befinden sich meist die Strommessspiegel für die piezo-resistiven Spannungsmessungen (Abbildung 48). Vergleicht man zusammenfassend die mittleren Spannungswerte von den Oberflächen der einzelnen Chips, wird die Tendenz aus Abbildung 42 sehr deutlich. Im Grundzustand weist die Chipoberfläche auf Chip 12.2 eine mittlere Spannung von -10 MPa bis -35 MPa auf, welche sich nach dem Die Attach-Prozess auf 0 MPa bis -30 MPa nur leicht ändert. Nach dem Wirebond-Prozess findet eine starke Änderung auf -180 MPa bis -190 MPa statt.

Bei den vorherigen Abbildungen wurde schon deutlich, dass es trotz der bewusst ausgewählten und vorher getesteten Messpositionen Bereiche gibt, die kein auswertbares Siliziumsignal liefern. Aus diesem Grund, wurden am Schluss noch einmal die Intensitäten des Siliziumpeaks auf den einzelnen Chips nach den entsprechenden Prozessschritten betrachtet und miteinander verglichen (Abbildungen 49 bis 51).

Es wird bei allen drei Abbildungen deutlich, dass ein Großteil der zuvor gewählten Messpunkte kein zuverlässiges Raman-Signal vom Silizium liefern (schwarz-transparente Bereiche). Es fällt weiterhin auf, dass sich die drei Abbildungen sehr ähneln und besonders im Zentrum der Spannungsmesschips der Anteil von schwarzen Bereichen sehr hoch ist. Nur vereinzelt gibt es hier Messpunkte mit Amplituden deutlich über der Nachweißgrenze.

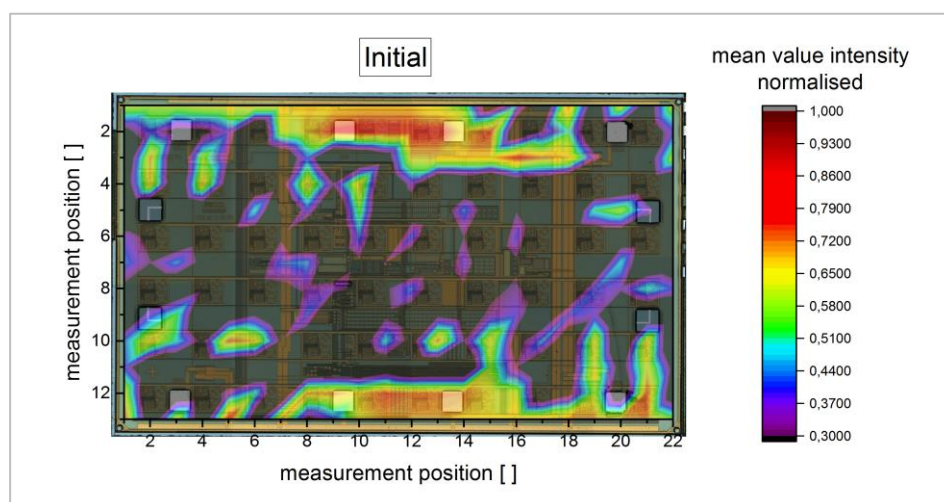


Abbildung 49: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips im Grundzustand

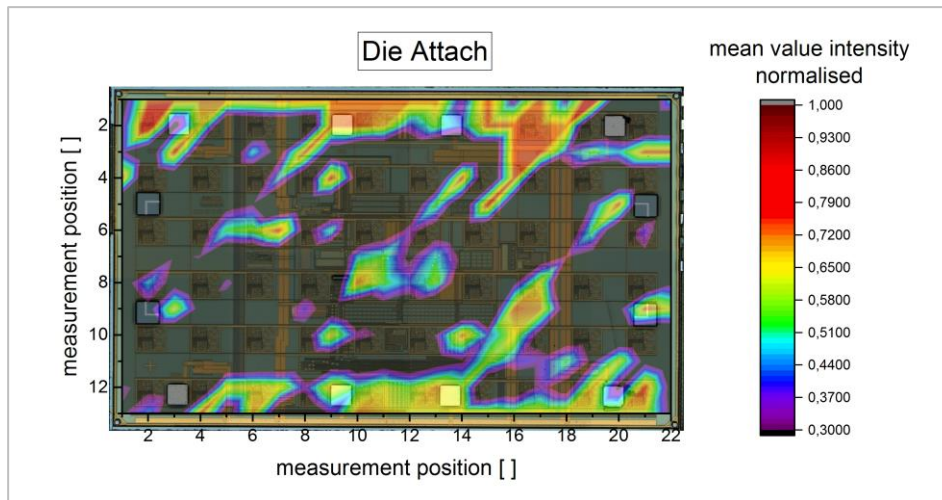


Abbildung 50: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips nach dem Die Attach

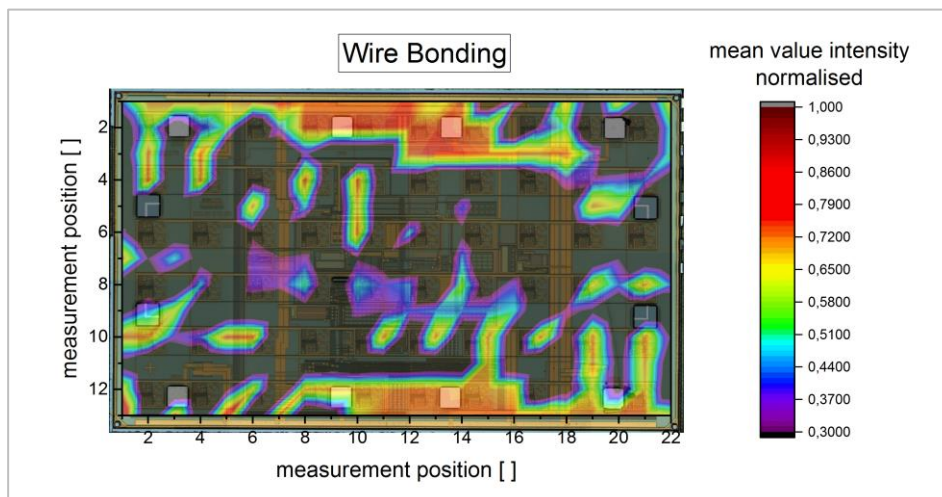


Abbildung 51: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips nach dem Wirebond-Prozess

Der Grund dafür sind die Metallisierungen für die Logikschaltung und die Kontakte zu den einzelnen Strommessspiegeln, welche sich hauptsächlich in der Mitte des Chips befinden. An diesen Stellen kann keine Raman-Streuung stattfinden, da die Metallisierungen nicht Raman-aktiv sind. Das Laserlicht wird hier elastisch in Form der Rayleigh-Streuung oder inelastisch in Form von Brillouin-Streuung reflektiert. Die Brillouin-Streuung ist im Gegensatz zur Raman-Streuung, bei welcher die optischen Phononen wechselwirken, die Interaktion mit akustischen Wellen (Shen, et al., 1965). Die Rayleigh- und Brillouin-Streuung sind mit dem verwendeten Raman-Spektrometer nicht messbar, da die Rayleigh-Streuung bei 0cm^{-1} und die Brillouin-

Streuung üblicherweise unter 16 cm^{-1} liegt (Dil, et al., 1976). Der spektrale Bereich des verwendeten Raman-Spektrometers liegt jedoch bei 50 cm^{-1} bis 3500 cm^{-1} .

Im Gegensatz dazu wurden im linken und mittleren Abschnitt der oberen Kante und im rechten und mittleren Abschnitt der unteren Kante bei allen Prozessschritten hohe Siliziumpeak-Amplituden gemessen (gelbe und rote Bereiche). Zusätzlich gibt es Positionen in der Mitte des Chips, welche unabhängig vom Prozessschritt ein Siliziumsignal liefern. Solche Positionen sind zum Beispiel $y=5$ und $x=22$ oder bei $y=10$ und $x=5$ (Abbildungen 49 bis 51). Bei zukünftigen Raman-Messungen auf Chips mit diesem Layout kann die Anzahl der Messpunkte nochmals reduziert werden und nur die Positionen ausgewählt werden, welche in den Abbildungen 49 bis 50 eine normalisierte Intensität von größer 0,3 counts (violett) zeigen. Da die Messpunkte mit einer normalisierten Intensität größer 0,3 counts unabhängig von den Prozessschritten sind, können diese Messpunkte somit für alle Spannungsmesschips verwendet und verglichen werden.

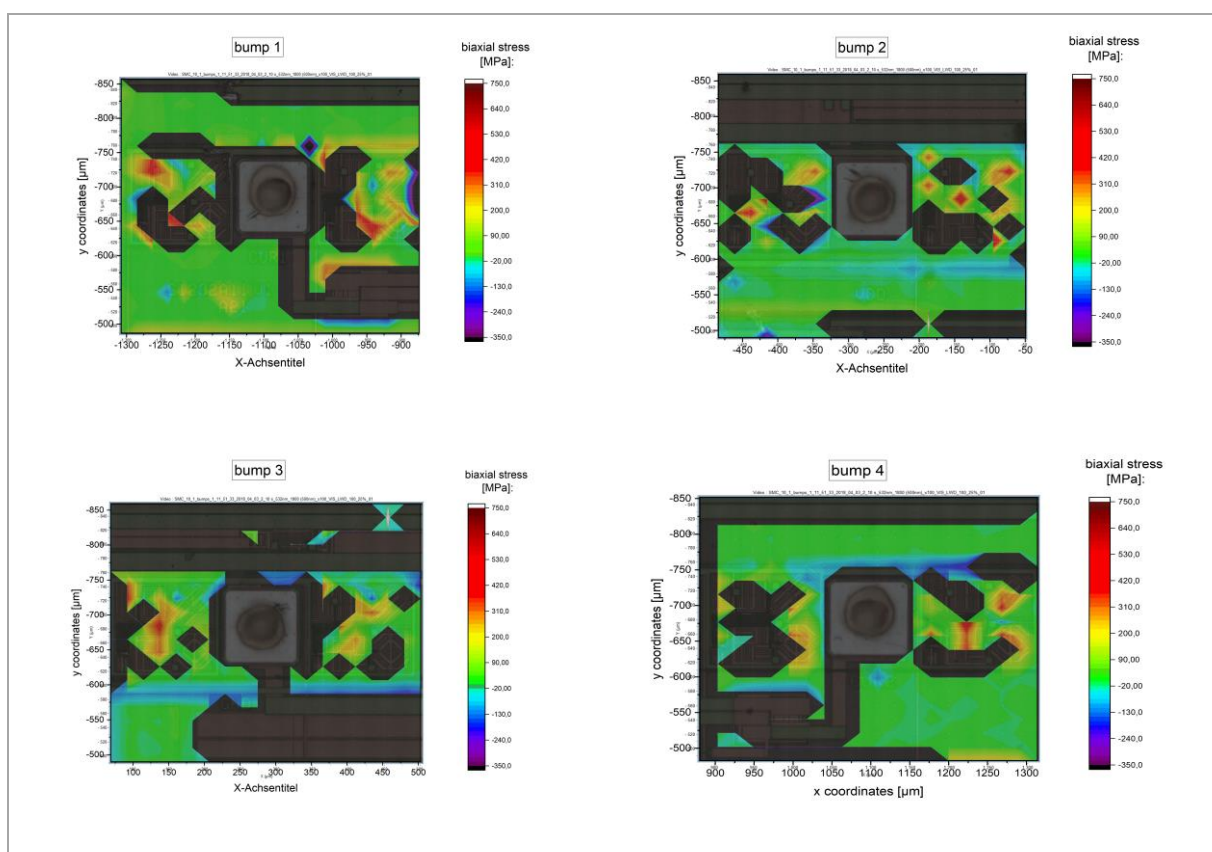


Abbildung 52: Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses vom Wirebond-Prozess um die vier gesetzten Bumps

Nachdem der globale Einfluss des gesamten Chips in Abhängigkeit der Prozessschritte untersucht wurde, wurden die Bereiche um die Kontaktpads nach dem Wirebond-Prozess genauer betrachtet. Es wurde vermutet, dass bei diesem Prozess das Setzen der Bumps die mechanische Spannung lokal verändert. Um den lokalen Einfluss zu untersuchen, wurden auf dem Spannungsmesschip 10.1 zusätzliche Raman-Messungen um die vier Bond-Pads herum mit einem geringeren Punktabstand und einer damit verbundenen höheren Auflösung durchgeführt.

Die Detailaufnahmen der Chipoberfläche in Abbildung 52 zeigen, dass der Einfluss des Aufdrückens beim Wirebond-Prozess zumindest an der Oberfläche nicht nachweisbar ist. Das kann mitunter auch daran liegen, dass um die Bond-Pads herum meist Metallisierungen liegen, die das Raman-Signal beeinflussen und zum Teil auch verhindern, dass das Siliziumsignal messbar ist. Es wurde auch vermutet, dass der Einflussbereich des Wirebond-Prozesses nicht viel größer als das Bond-Pad selbst ist. Im Gegensatz zu den Raman-Messungen an der Oberfläche, zeigen die Messungen an den Schlifffkanten einen deutlichen Einfluss unterhalb der Bond-Pads (Abbildung 53).

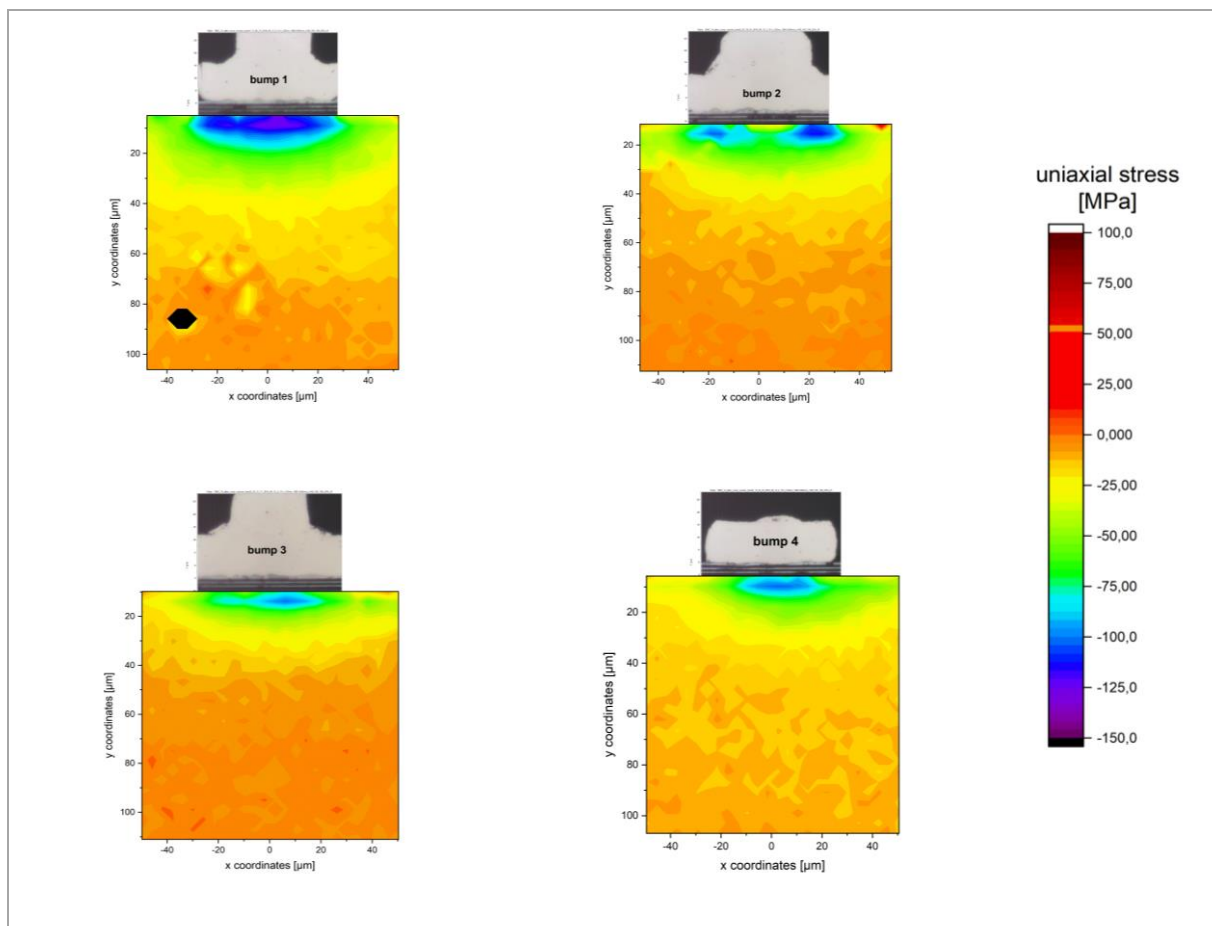


Abbildung 53: Bestimmung des Einflusses des Wirebond-Prozesses auf die Spannung im Silizium nach dem Schliff

Die Raman-Messungen in Abbildung 53 wurden an Schlifflinien gemessen. Diese Schlifflinien wurden von drei weiteren Spannungsmesschips nach dem Verfahren aus Kapitel 3.3.1. angefertigt, um den Einfluss des jeweiligen Prozesses über die komplette Chipdicke zu untersuchen. Dazu wurden die Chips eingebettet und bis zur Chipkante herangeschliffen. Lediglich für die Untersuchung des Einflusses des Wirebond-Prozesses wurde weiter als bis zur Chipkante geschliffen. Es wurde dabei versucht bis zur Mitte aller vier Bumps zu schleifen. Dadurch konnte die mechanische Spannung direkt unterhalb der Bumps gemessen werden. Für dieses Experiment wurden Chips verwendet, welche nicht aus der verwendeten Messserie stammen, da diese weiterprozessiert wurden. Die Ergebnisse aus den Raman-Messungen, sowohl von der Oberfläche als auch von der Schlifflinie, sind in den Abbildungen 52 und 53 zu erkennen.

Der Einflussbereich des Wirebond-Prozesses liegt lateral bei ungefähr $80\ \mu\text{m}$ und dehnt sich bis ungefähr $80\ \mu\text{m}$ über die Chipdicke aus. Das bedeutet, dass der Einflussbereich, in dem sich die mechanische Spannung scheinbar halbkreisförmig von der Oberfläche ausgehend ändert, viel kleiner ist als das Bond-Pad (ungefähr $120\ \mu\text{m}$). Damit kann der Einfluss des Wirebond-Prozesses, wie in Abbildung 53 zu sehen ist, nicht von der Oberfläche des Chips gemessen werden. Vergleicht man die Bilder untereinander, so fällt auf, dass die Schlifflinienoberfläche unterhalb von Bump 4 eine leicht andere Färbung hat. Zudem sind die Bereiche der maximalen Spannung und der Wert der maximalen Spannung mit $10\ \text{MPa}$ bei Bump 4 im Vergleich zu den anderen Bumps mit $0\ \text{MPa}$ leicht erhöht. Hier scheint sich die Spannung, welche lokal durch den Wirebond-Prozess erzeugt wurde, mit der globalen Spannungsänderung des Die Attach-Prozesses zu überlagern. Dies geht auch deutlich aus der nachfolgenden Abbildung 54 hervor.

Bei Bump 1 liegt die Maximalspannung mittig unter der Bondfläche und beträgt $-130\ \text{MPa}$. Beim zweiten Bump liegt die Maximalspannung eher links und rechts unter den Enden des Bondbereichs und beträgt $-115\ \text{MPa}$. Bei Bump 3 und 4 sind die Bereiche des Spannungsmaximums wieder mittig unterhalb der Bondfläche. Allerdings beträgt die Maximalspannung bei beiden Bumps $-100\ \text{MPa}$. Der Grund für die Unterschiede können zum einen Schwankungen im Wirebond-Prozess sein oder was wahrscheinlicher ist, dass anhand der unterschiedlichen Formen der Bumps, welche im Hintergrundbild in Abbildung 55 zu sehen sind, der Schliff nicht ganz parallel zur Chipkante angefertigt wurde oder die Bumps nicht exakt in einer Reihe auf das Pad gebondet wurden. Dennoch kann man sagen, dass die höchste mechanische Spannung mittig unter dem Bond zu messen ist. Bei Bump 1 liegt die maximale Spannung bei $-126\ \text{MPa}$ (violett). Der angrenzende blaue Bereich mit $-100\ \text{MPa}$ bis $-115\ \text{MPa}$ endet ziemlich genau mit dem Ende der Bondfläche. Danach nimmt die mechanische Spannung

weiter über -60 MPa (grün), -30 MPa (gelb) bis hin zu 0 MPa (orange) zu. Dies entspricht der Schliffoberfläche mit nicht verspanntem Silizium. Die anderen Bumps zeigen einen ähnlichen Gradienten unterhalb der Bondfläche. Außerhalb der Bondfläche ist die mechanische Spannung nur noch halb so groß.

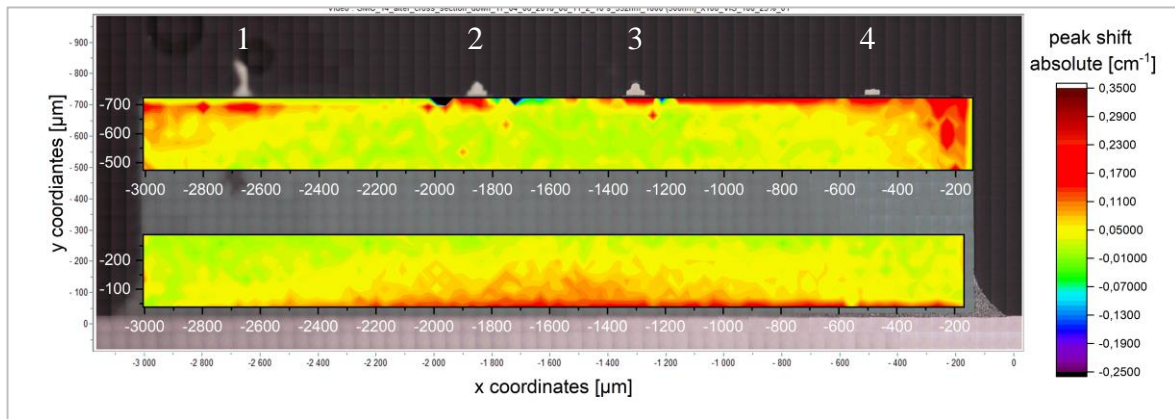


Abbildung 54: Peak-Verschiebung des Siliziums am Schliff nach dem Wirebond-Prozess

Die in Abbildung 54 gezeigte Peak-Verschiebung lässt auf eine konvexe Verbiegung des Spannungsmesschips schlussfolgern. Die angenommene konvexe Chipverbiegung wird aus der Tatsache abgeleitet, dass die Chipunterseite in der Mitte Druckspannung zeigt (positives Vorzeichen) und die Chipoberseite geringe Zugspannung (negatives Vorzeichen) (De Wolf, 2015).

Zusätzlich zur Untersuchung des lokalen Einflusses des Wirebond-Prozesses, wurden die angefertigten Schliffe dazu genutzt, um die Veränderung der mechanischen Spannung am Interface zwischen Silizium und dem Die Attach zu untersuchen. Damit der Vergleich zum Die Attach-Prozess hergestellt werden kann, wurden zusätzlich Schliffe von zwei Chips aus diesem Aufbauschnitt in Auftrag gegeben. Anschließend wurde die mechanische Spannung mit Hilfe der Raman-Spektroskopie bestimmt (Abbildung 55 und 56). Auch bei diesem Experiment zeigt sich der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die Spannung am Interface zum Die Attach.

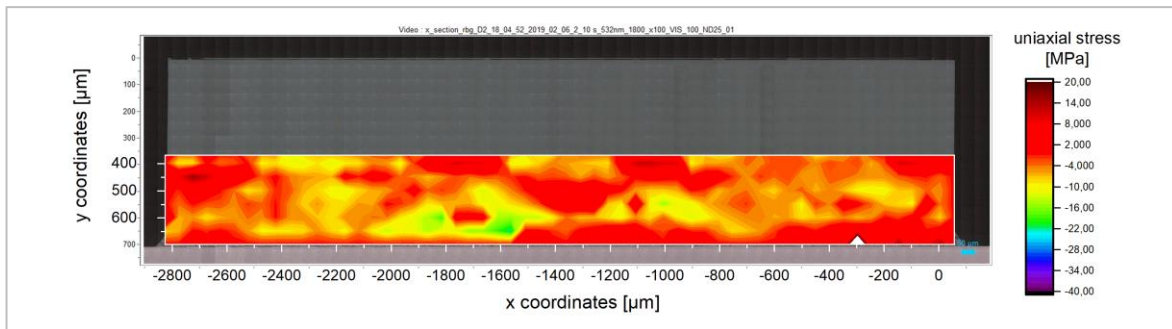


Abbildung 55: Uniaxiale Spannungen am Interface nach dem Die Attach-Prozess

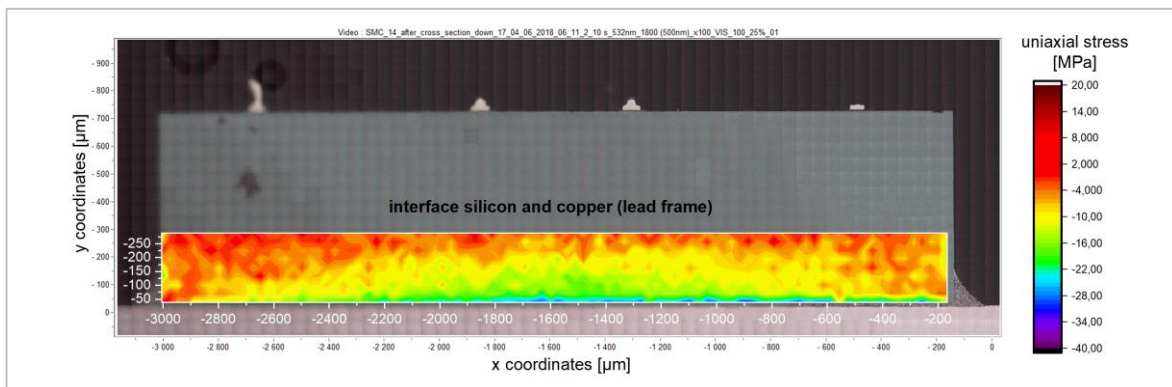


Abbildung 56: Uniaxiale Spannung am Interface nach dem Wirebond-Prozess

Die Ergebnisse der Spannungsberechnung in Abbildung 55 zeigen eine hauptsächlich rote Färbung (-2 MPa bis 4 MPa). Vereinzelt gibt es Bereiche mit -5 MPa (gelb) und -15 MPa (grün). Das Histogramm in der folgenden Abbildung 57 zeigt, dass es darüber hinaus wenige Bereiche mit mechanischer Spannung im Bereich von 5 MPa bis 15 MPa gibt. Es ist aber keine eindeutige Tendenz der Spannungswerte zu erkennen. Es sind hier keine Spannungsspitzen beziehungsweise Bereiche mit erhöhter Spannung am Interface zum Kupfer zu sehen. Daher wird vermutet, dass hier der Die Attach gleichmäßig ausgehärtet ist und es keine Bereiche gibt, bei welchen sich der Die Attach stärker zusammengezogen hat.

Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung 56, dass die Spannung nach dem Wirebond-Prozess mittig am Interface eher im Bereich von -20 MPa bis -30 MPa (blau bis grün) liegt, nach außen hin auf -5 MPa bis -15 MPa (grün bis gelb) sinkt und auch in Richtung der Chipoberfläche mit 0 MPa bis -4 MPa (gelb bis rot) abnimmt. Das lässt darauf deuten, dass sich der Kleber nach dem Aufheizen während des Wirebond-Prozesses und dem anschließenden wieder Abkühlen in der Mitte stärker zusammengezogen hat, da hier die Spannung am höchsten ist. Nach außen nimmt die Spannung ab, was darauf deutet, dass der Schrumpf des Die Attach geringer war.

Zusätzlich zeigt der Vergleich der beiden Histogramme in Abbildung 57, dass ein Großteil der nach dem Wirebond-Prozess gemessenen mechanischen Spannungen kleiner sind als die Spannungswerte, welche nach dem Die Attach gemessen wurden.

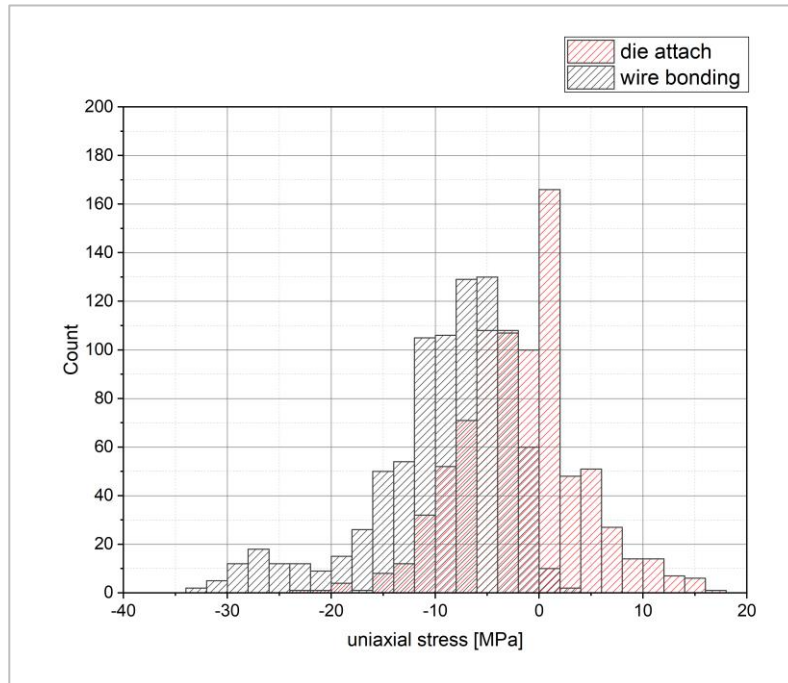


Abbildung 57: Überlagerung der beiden Histogramme von den Spannungswerten der Raman-Messungen an den Schliffen nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess

3.3.3. Partielle Dekapsulierung

Nachdem einige Spannungsmesschips bereits so präpariert wurden, dass man zum Beispiel den Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanischen Spannungen mittels Raman-Spektroskopie bestimmen kann, wird folgend darauf eingegangen, welchen Einfluss das partielle Freilegen von Bereichen des Chips ist, wie zu Beginn dieser Arbeit bereits erwähnt, notwendig, um einen optischen Zugang zur Probe für die Raman-Messungen zu erhalten. Eine Methode zur partiellen Dekapsulierung wurde bereits dazu genutzt, um den Einfluss des Wirebond-Prozesses zu untersuchen.

Mechanischer Schleifprozess

Hierfür wurden die Erkenntnisse aus dem Kapitel 3.3.1. genutzt. Das heißt, der Schleifvorgang besteht insgesamt aus drei Schleifschritten mit unterschiedlicher Körnung (30 μm , 15 μm , 8 μm) und einem abschließenden Ionenpolierschritt. Bei diesem kompletten Schleifvorgang ist

das Silizium in einem spannungsfreien Zustand. Nach dem Einbetten in Epoxidharz wurde das Mold-Compound von einer Seite des Packages so entfernt, dass die lange Seite des Spannungsmesschips sichtbar wird. Es wurde darauf geachtet, dass keine Metallisierungen beschädigt wurden, da so die Spannungsänderung durch das Entfernen des Mold-Compound mittels piezo-resistiver elektrischer Messung bestimmt werden kann. Die Ergebnisse aus den piezo-resistiven elektrischen Messungen werden in Kapitel 3.5.3. präsentiert.

Das Mold Compound wurde insgesamt an zwei fertig aufgebauten Spannungsmesschips ausgehend von einer der langen Seite entfernt. Die nachfolgenden Abbildung 58 (A) und (B) zeigen die Ergebnisse aus der Raman-Spektroskopie. Vergleicht man die beiden Flächendiagramme miteinander, so erkennt man, dass sich diese sehr ähnlich sind. In beiden sind die oberen Ecken und der obere Bereich, abgesehen von dem Bereich unterhalb der Metallisierungen des Chips, rot gefärbt (40 MPa). Zieht man die Ergebnisse der Peak-Verschiebung zusätzlich heran, wird deutlich, dass die Bereiche zugverspannt sind. Die Peak-Verschiebung in den Bereichen direkt unterhalb der Metallisierung (obere Mitte des Chips) weisen Druckspannungen auf und haben einen Spannungswert von ungefähr 50 MPa. Der Großteil der Mitte der beiden Spannungsmesschips ist gering bis gar nicht verspannt (grüner bis gelber Bereich).

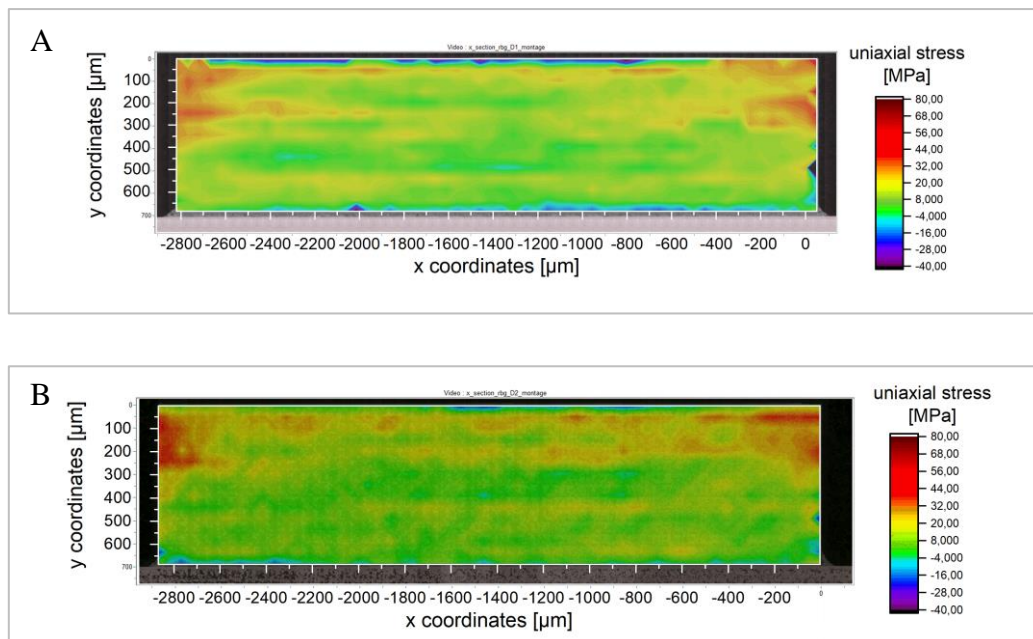


Abbildung 58: Mittels Raman-Spektroskopie bestimmte Spannungen an zwei Spannungsmesschips D1 (A) und D2 (B) nach dem Mold-Prozess

Die Spannungswerte liegen hier zwischen -5 MPa und 5 MPa. Das Interface zwischen Silizium und dem Die Attach zeigt ähnlich wie die Oberkante des Chips Druckspannungen. Diese liegen im Bereich zwischen -2 MPa (hellblau) und -40 MPa (rot).

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Spannungsmesschip nach dem Mold-Prozess eine leicht konvexe Biegung zeigt. Im Vergleich zum Spannungsmesschip nach dem Wirebond-Prozess (Abbildung 56) ist die Verbiegung in der Nähe des Interfaces deutlich geringer, da nach dem Mold-Prozess die Unterseite des Chips kaum noch mechanische Spannungen aufweist. Einzig die Bereiche in der Nähe des Die Attach zeigen Spannungswerte zwischen -15 MPa bis -25 MPa (blau bis hellblau).

Nachdem nun erfolgreich die Spannungsverteilung über die Dicke des Chips gemessen wurde, soll jetzt versucht werden, die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche zu messen. Dazu muss das Mold Compound über dem Chip entfernt werden, ohne dabei den Spannungszustand selbst zu verändern. Hierfür wurde als Verfahren das Laser-Dekapsulieren ausgewählt.

Zusätzlich zum flächigen Abtrag des Mold Compounds wurde in einem weiteren Experiment versucht an definierten Stellen Mold Compound zu entfernen, da vermutet wurde, dass je weniger Mold Compound entfernt wird, desto geringer auch die mechanische Spannung beeinflusst wird. Bei der Auswahl der Positionen auf dem Spannungsmesschip, über welchen das Mold Compound später entfernt werden sollte, wurden die Ergebnisse aus dem Vergleich der Intensitäten des Siliziumpeaks bei den unterschiedlichen Aufbausritten (Abbildungen 49 bis 51 aus Kapitel 3.3.2.) herangezogen. Nur die Positionen auf dem Chip, die bei den einzelnen Aufbausritten ein sicheres Siliziumspektrum zeigen, liefern mit großer Wahrscheinlichkeit nach dem Entfernen des Mold Compound auch noch einen intensiven Siliziumpeak (Signal-Rausch-Verhältnis besser als 3:1).

Als Methoden für dieses Experiment kamen nur das Laser-Dekapsulieren und das Dekapsulieren mittels Mikrofräse in Betracht. Die Auswahl fiel auf diese beiden Verfahren, da sie zum einen die Möglichkeit bieten lokal definiert auch geringe Volumina von Mold Compound zu entfernen und zum anderen da sie intern bei Infineon verfügbar sind.

Laser-Dekapsulieren

Beim Laser-Dekapsulieren wurden drei unterschiedliche Experimente durchgeführt.

In dem ersten Experiment sollte an definierten Stellen Mold Compound-Masse entfernt werden. Die definierten Positionen resultieren dabei aus den Raman-Messungen und sind Positionen auf dem Chip, die ein gutes Siliziumsignal liefern und mit Hilfe derer eine gute Aussage über die Spannung im Chip getroffen werden kann. In dem zweiten Experiment wurde in mehreren Schritten Mold Compound-Masse Schicht für Schicht oberhalb des Chips komplett flächig entfernt. Daraus konnte der Einfluss des entfernten Mold Compound-Volumens auf die Spannung im Chip bestimmt werden. Im dritten Experiment wurde das Mold Compound in mehreren Schritten Schicht für Schicht von der Seite des Spannungsmesschips entfernt. Das dritte Experiment ähnelte dem zweiten, allerdings wurde der Chip hier nicht von oben präpariert, sondern von der kurzen Seite. Dadurch wurde das entfernte Volumen pro Dekapsulierschritt kleiner. Hintergrund der beiden letzten Experimente sind zwei unterschiedliche Fragestellungen. Beim Entfernen des Mold Compounds von der Seite wird beispielsweise die Untersuchung von Schichtsystemen und der gegenseitige Einfluss der Schichten auf die mechanischen Spannungen ermöglicht.

Das Laser-Dekapsulieren an den definierten Stellen für das erste Experiment wurde extern mit der GATAN am Center für Angewandte Mikrostrukturdiagnostik (CAM), welches zum Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) gehört, durchgeführt.

Da keine der oben genannten Experimente erfolgreich das Mold Compound so entfernt hat, dass es möglich war, ein Raman-Signal von der Siliziumoberfläche zu erhalten, können im Folgenden keine Ergebnisse der Raman-Messungen präsentiert werden. Der Grund dafür war zum Großteil die Inhomogenität des Mold Compounds, welche aufgrund der unterschiedlich großen Siliziumoxid-Partikel als Füllstoff zustande kommt. Diese Partikel können durch den hohen Energieeintrag des Lasers aufschmelzen und danach nur noch schwer mittels Laser entfernt werden. Beim flächigen Abtrag von Mold Compound ist dieses Problem nicht so gravierend, da das Material um den aufgeschmolzenen Füllstoffpartikel nach wie vor entfernt werden kann. Dabei wird der aufgeschmolzene Füllstoffpartikel nach und nach frei gelegt und in einer der folgenden Dekapsulierschritte mitentfernt. Im Gegensatz dazu werden beim partiellen Dekapsulieren nur kleinere Bereiche Mold Compound entfernt. Schmilzt hierbei ein Siliziumoxid-Füllstoffpartikel auf, ist es aufgrund der geringen Abtragsfläche kaum möglich

diesen aufgeschmolzenen Füllstoffpartikel zu entfernen. Demzufolge ist es hierbei nicht mehr möglich, den Spannungsmesschip frei zu legen. Ein zweites Problem, welches durch die kugelhähnliche Form der Siliziumoxid-Füllstoffpartikel entstehen kann, ist der Linseneffekt. Dieser kann in der Nähe der Chipoberfläche dazu führen, dass das Laserlicht auf die Chipoberfläche fokussiert wird und sie somit beschädigt.

Mikrofräse

Mit der Mikrofräse (Kern HSPC/ Kern Evo) wurde ähnlich wie beim Laser-Dekapsulieren das Mold Compound an definierten Stellen entfernt. Es standen verschiedene Fräser mit den unterschiedlichen Fräsdurchmessern 20 μm , 30 μm , 50 μm , 70 μm , 100 μm und 200 μm zur Verfügung. Die Länge des jeweiligen Fräfers berechnet sich über den doppelten Fräsdurchmesser. In einem ersten Versuch wurden die unterschiedlichen Fräsdurchmesser getestet. Dabei wurde mit dem Fräser mit 50 μm Fräsdurchmesser begonnen. Nachdem während des Fräsvorgangs durch die Inhomogenität des Mold-Compounds einige Fräser abgebrochen sind, wurde entschieden, die Fräser mit einem noch kleineren Durchmesser von 20 μm und 30 μm gar nicht erst zu testen. Das Experiment hat gezeigt, dass der Fräser mit einem Durchmesser von 100 μm die für das Material nötige Stabilität besitzt. Da die Länge dieses Fräfers aber nur 200 μm ist, musste zuvor zweimal mit dem 200 μm Fräser vorgefräst werden, um ein Loch über die gesamte Dicke des Mold Compounds von 1400 μm zu bohren.

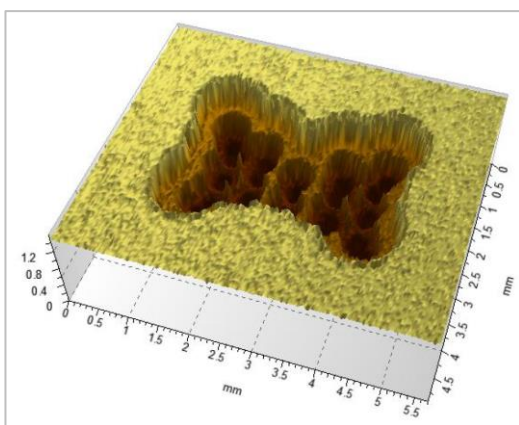


Abbildung 59: Ergebnis der Oberflächenanalyse mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

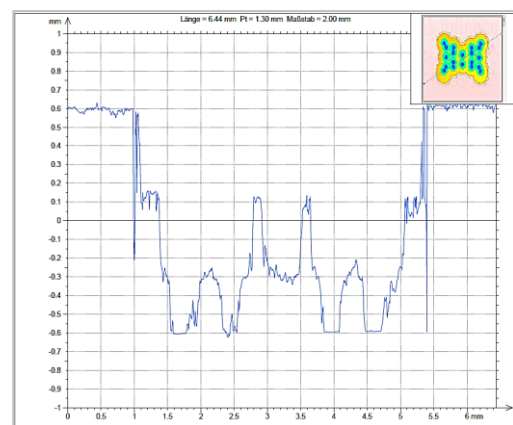


Abbildung 60: Linienscan über die Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

Um sicherzustellen, dass die Chipoberfläche durch das Mikrofräsen nicht beschädigt wird, wurden die letzten 50 µm Mold Compound mit dem Plasmaätzverfahren entfernt. Im ersten Schritt wurden zwanzig Positionen auf dem Spannungsmesschip festgelegt.

Für das Mikrofräsen wurden die Koordinaten der einzelnen Messpositionen zur Chipkante benötigt. Diese wurden zuvor an einem optischen Mikroskop vermessen. Der Abstand von der Chipkante des vergossenen Chips zum ersten Kontaktpin wurde mittels X-Ray-Tomografie bestimmt. Für die Ausrichtung des zu fräsenden Spannungsmesschips in der Mikrofräse wurde zu Beginn der Versuchsreihe noch ein durchgehendes Loch abseits des Chips gefräst. Später wurde dieses Loch durch ein kleineres mit Silberleitkleber gefülltes Loch ersetzt. Durch den Silberleitkleber erhält man im Ultraschall einen starken Kontrast, welcher das Ausrichten der Fräslöcher vereinfacht. Außerdem führte das dazu, dass das weg präparierte Volumen an Mold Compound reduziert wurde.

Im ersten Versuch wurden 24 Löcher nach dem oben beschriebenen Prinzip in das Mold Compound gefräst (Abbildung 59 und 60). In der folgenden Abbildungen 61 werden die Ergebnisse der Raman-Spektroskopie-Messung dargestellt.

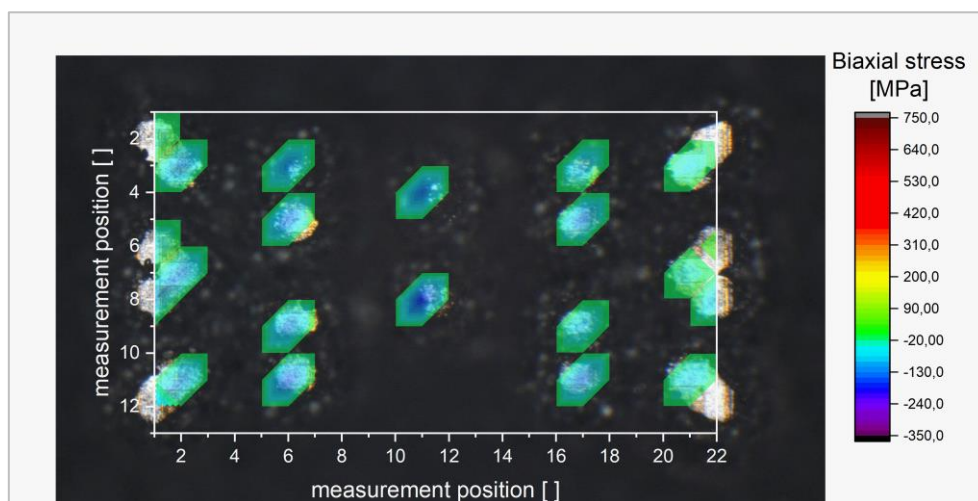


Abbildung 61: Ergebnis der Raman-Messung am partiell dekapsulierten Chip mit 24 gefrästen Löchern

Die Abbildung 61 zeigt, dass es möglich ist nach dem partiellen Dekapsulieren des Spannungsmesschips Raman-Signale von der Siliziumoberfläche aus allen 24 Löchern zu erhalten. Demzufolge ist der Durchmesser der gefrästen Löcher ausreichend groß gewählt. Pro gefrästem Loch wurde ein Punkt mittels Raman-Spektrometer gemessen. Der Vergleich zum

Ergebnis der Raman-Messung nach dem Wirebond-Prozess (Abbildung 47), ist nicht an jedem Punkt möglich, da bereits in Abbildung 47 ein Großteil der Siliziumoberfläche kein Raman-Signal liefert. Dennoch kann man gerade an der linken und rechten Seite die Ergebnisse beider Messungen gut miteinander vergleichen. Die Messpunkte im linken Teil des Chips zeigen nach dem partiellen Dekapsulieren mit -120 MPa eine geringere Spannung als nach dem Wirebond-Prozess mit 100 MPa. Am rechten Rand des Spannungsmesschips sind die mechanischen Spannungen angestiegen. Hier lagen die Spannungswerte nach dem Wirebond-Prozess bei ungefähr 90 MPa und nach dem Molding und anschließendem partiellen Dekapsulieren bei ungefähr -130 MPa.

Im anschließenden Experiment wurde die Anzahl der zu dekapsulierenden Positionen auf ein Minimum reduziert. Das bedeutet, dass die Anzahl der Dekapsulier-Positionen so reduziert wurde, dass gerade noch aus den Raman-Messungen eine Aussage darüber getroffen werden kann, wie die Verbiegung des Spannungsmesschips ist. Dazu wurden die Positionen in den jeweiligen Ecken des Chips und zwei Positionen in der Chipmitte ausgewählt und somit insgesamt sechs Löcher gefräst. Die Abbildungen 62 und 63 zeigen die 3D-Profile und die Höhenprofile der Weißlichtinterferometer-Messung von der Oberfläche des partiell dekapsulierten Chips.

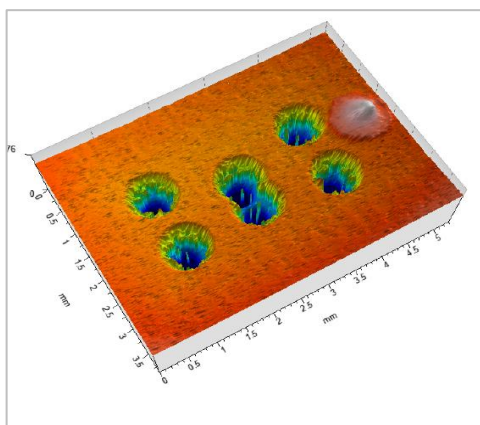


Abbildung 62: Ergebnis der Oberflächenanalyse mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

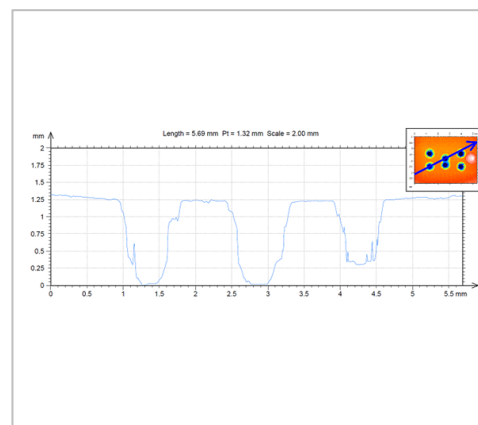


Abbildung 63: Linienscan über die Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

In der nachfolgenden Abbildung 64 ist das Ergebnis aus der Bestimmung der mechanischen Spannung mittels Raman-Spektrometer nach dem Dekapsulieren von 6 Löchern zu sehen. Im Vergleich zur Raman-Messung am Chip mit 24 Löchern ist hier die Spannung sehr viel höher. Lagen die Spannungen in einem Großteil der 24 Löcher zwischen -110 MPa und -140 MPa, so

liegen die Werte der mechanischen Spannung in den 6 Löchern bei 650 MPa. Der Unterschied zwischen den beiden Experimenten ist sehr groß. Mögliche Gründe dafür können sein, dass der Chip im ersten Experiment mit 24 Löchern stark relaxiert ist oder dass eine leichte Variation der Dekapsulier-Positionen andere Bereiche des Chips freiliegt, welche andere mechanische Spannungen besitzen. Darüber hinaus könnte auch ein veränderter Spannungseintrag in den Chip während des Mold-Prozesses stattgefunden haben.

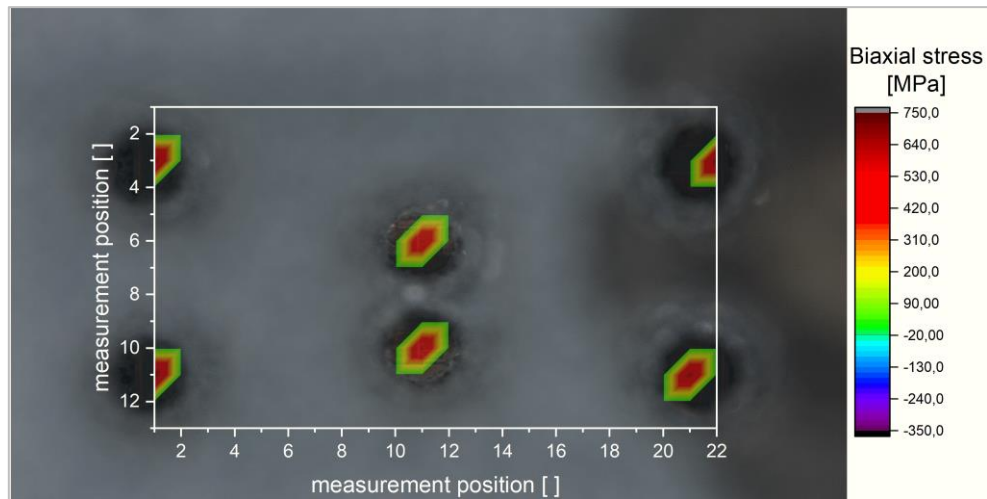


Abbildung 64: Ergebnis der Raman-Messung am partiell dekapsulierten Chip mit sechs gefrästen Löchern

3.4. Stabilität und Zuverlässigkeit der elektrischen Messungen

3.4.1. Messsystem Nadeltester

Einfluss der Temperatur

Der verwendete Nadeltester ist ein komplett eingehaustes System, das sich auf einer Marmorplatte befindet. Das Gehäuse hat den Vorteil, dass die Temperatur in der Kammer, wie aus Abbildung 65 (A) hervorgeht, nicht so stark von den Schwankungen im Raum abhängig ist. Eine gewisse Temperaturstabilität ist wegen der Temperaturabhängigkeit des piezo-resistiven Koeffizienten sehr wichtig (Mohammed, et al., 2011). Zusätzlich ist es durch die Einhausung möglich, den Chip ohne einen Einfluss von Licht zu messen, da dieses das Messergebnis verfälschen würde. Die Marmorplatte dient zur mechanischen Entkopplung des Messsystems.

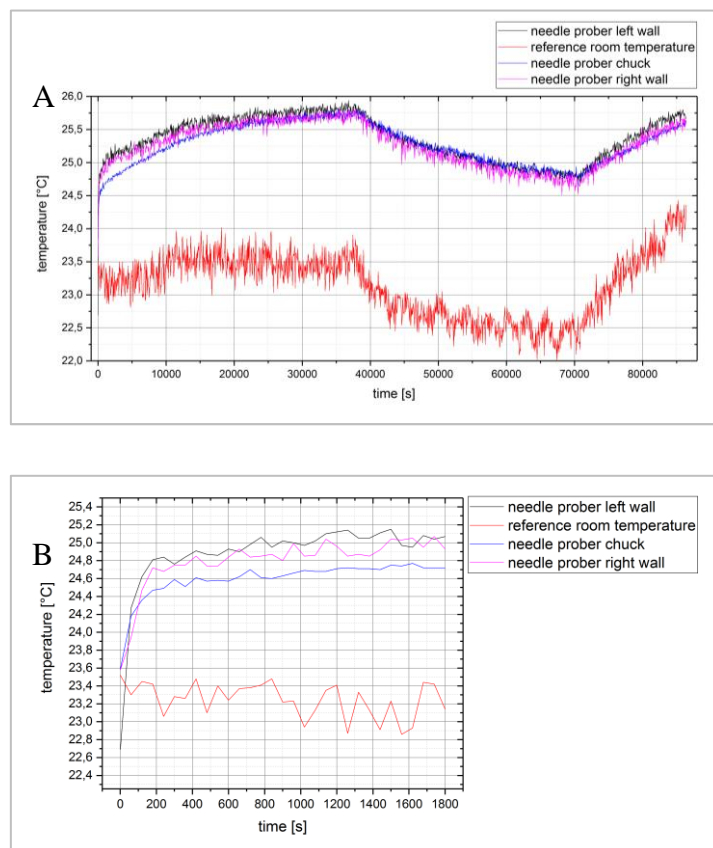


Abbildung 65: Ergebnisse der Temperaturmessung über 24 Stunden in und um den Nadeltester bei geschlossener Tür (A) und detaillierter 30-Minuten-Ausschnitt (B)

Die Temperaturmessungen in und um den Nadeltester zeigen, dass die Temperatur über den Tag verteilt schwankt. Dabei folgt die Temperatur im Nadeltester der Raumtemperatur (rote Kurve in Abbildung 65) mit einem Offset von ungefähr 2 °C. Der Offset kommt durch die

Elektronik im Nadeltester zustande. Trotz der Schwankungen über den Tag, ist in Abbildung 65 (B) zu erkennen, dass die Temperatur während des Zeitraumes von 30 Minuten im Nadeltester nahezu konstant bleibt. Der Zeitraum von 30 Minuten entspricht genau der Dauer von drei Einzelmessungen auf ein und demselben Chip. Danach wird die Kammer vom Nadeltester geöffnet und das Leadframe weiter zum nächsten Chip geschoben, welcher dann wieder kontaktiert wird. In dieser Zeit gleicht sich die Kammer wieder ungefähr der Raumtemperatur an, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Temperatur für die Messung der einzelnen Chips immer nahezu gleich ist. Für die Berechnung des piezo-resistiven Koeffizienten wurde eine Temperatur von 25 °C angenommen.

Einfluss der Nadeln zum Kontaktieren

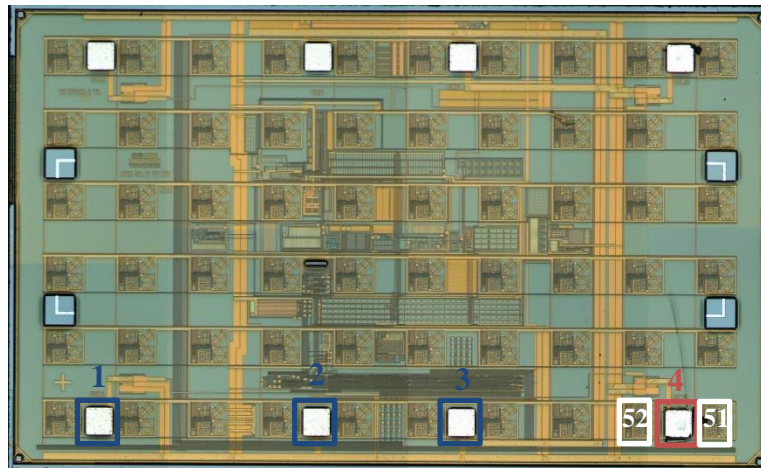


Abbildung 66: Mikroskopbild eines Spannungsmesschips mit den vier markierten Kontaktpads und den beiden weiß markierten Transistoren 51 und 52

Der Nadeltester selbst besteht aus einem steuerbaren Vakuumentisch, einer zweiten Ebene für die Nadelmanipulatoren und einem Mikroskop. Insgesamt werden für die Kontaktierung des Chips vier Nadelmanipulatoren benötigt, welche mittels Vakuum auf der zweiten Ebene fixiert sind. Durch die Nadelmanipulatoren ist es mit Hilfe von Mikrometerschrauben möglich die Nadeln in X-, Y- und Z-Richtung zu bewegen. Der Einfluss der Aufdruckkraft der Nadel beim Kontaktieren der Spannungsmesschips auf die gemessene Spannung wurde durch das Ändern der Z-Höhe in Mikrometerschritten untersucht. Aufgrund der Größe des Kontaktpads war lediglich eine Änderung der Z-Höhe von 8µm möglich, da die Nadelspitze und die Nadel selbst bei höherer Aufdruckkraft nachgibt und über das Kontaktpad schiebt. Während des

Experiments wurde die Aufdruckkraft der Nadel geändert, welche den Chip auf dem Pad 4 kontaktiert (roter Rahmen in Abbildung 66). Die Aufdruckkraft aller anderen drei Nadeln (Pad 1 bis Pad 3 mit blauem Rahmen in Abbildung 66) wurde konstant gehalten. Um möglichst reale Messbedingungen zu erhalten, wurden für alle vier Nadelmanipulatoren neue Nadeln eingesetzt.

Die Graphen in den nachfolgenden Abbildungen 67 und 68 zeigen die Differenzen der jeweiligen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} zwischen der geringsten und der höchsten Eindruckkraft auf das Kontaktpad. Die größten Spannungsänderungen sind an den Transistoren 51 und 52 zu erkennen, welche dem Kontaktpad 4 mit der veränderlichen Eindruckkraft am nächsten liegen. Man erkennt, dass diese beiden Transistoren die größte Spannungsänderung zeigen, wobei die Spannungsänderung des Transistors 52 am größten ist.

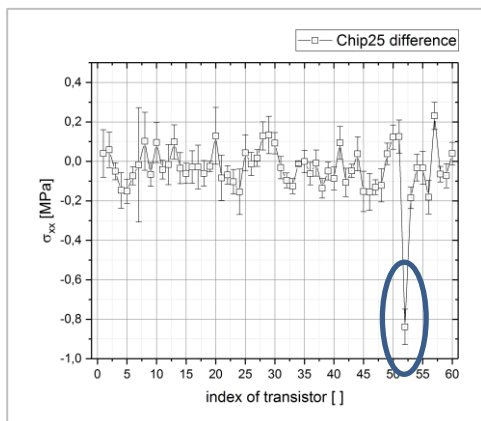


Abbildung 67: Differenz der Spannungen in X-Richtung zwischen der kleinsten Eindruckkraft und der höchstmöglich Eindruckkraft

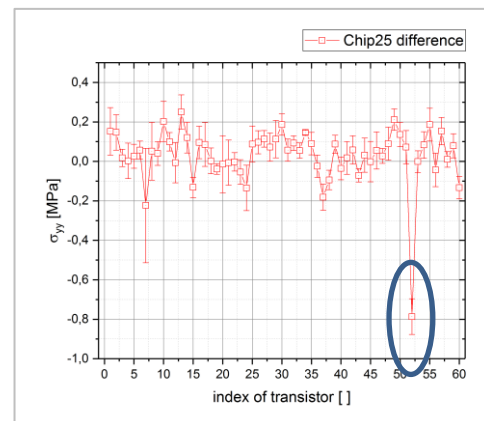


Abbildung 68: Differenz der Spannungen in Y-Richtung zwischen der kleinsten Eindruckkraft und der höchstmöglich Eindruckkraft

Schaut man sich nun die Graphen der Abbildungen 69 bis 72 für die Spannungskomponenten der betroffenen Transistoren 51 und 52 an, so ist der Einfluss der Eindruckkraft besonders bei der Spannungskomponente σ_{xx} und σ_{yy} von Transistor 52 deutlich zu erkennen. Die beiden Abbildungen 71 und 72 zeigen, dass die mechanischen Spannungen σ_{xx} und σ_{yy} mit steigender Eindruckkraft immer kleiner werden. Die gemessene mechanische Spannung an diesem Transistor wird bis zu einer Höhenänderung von 5 μm linear kleiner und nimmt danach quadratisch ab. Im Gegensatz dazu sinkt die Spannungskomponente σ_{yy} beim Transistor 51 bei einer Höhenänderung von 2 μm sehr stark ab, schwankt dann ein wenig und steigt bei einer Höhenänderung von 5 μm schnell an bis sie bei ungefähr 7,5 μm wieder den ursprünglichen Spannungswert erreicht. Bei einer Höhenänderung von 8 μm ist der Wert sogar größer als der

Ausgangswert. Der Grund für die Änderung der Verläufe der Graphen für die Spannungskomponente σ_{yy} beider Transistoren in Abbildung 70 und 72 ist vermutlich die Position der Nadel auf dem Kontaktpad bei der jeweiligen Höhenänderung, da die Nadelspitze mit zunehmender Aufdruckkraft über das Kontaktpad wandert. Dabei wird der Abstand zum Transistor 51 immer größer und zum Transistor 52 immer kleiner. Zeitgleich nimmt dadurch der Einfluss der Nadel auf Transistor 51 immer weiter ab, während der Einfluss auf den Transistor 52 zunimmt. Bestätigt wird diese Vermutung auch durch die Graphen für die Spannungskomponente in X-Richtung beider Transistoren in den Abbildungen 69 und 70. Dort sinkt der Spannungswert von Transistor 52 mit steigender Eindruckkraft, wohingegen der Spannungswert für Transistor 51 größer wird.

Bei einer Höhenänderung von 5 μm wandert die Kontaktnadel aus dem Einflussbereich von Transistor 51 und rutscht in den von Transistor 52. Dies geschieht ungefähr in der Mitte des Kontaktpads. Um den Einfluss des Kontaktierens zu minimieren, sollte die Nadel daher mittig und entlang der Y-Achse auf den Kontaktpads kontaktiert werden. Zudem sollte die Kontaktnadel so leicht wie möglich auf dem Pad abgesetzt werden, um die Spannungswerte der umliegenden Transistoren nicht zu verfälschen.

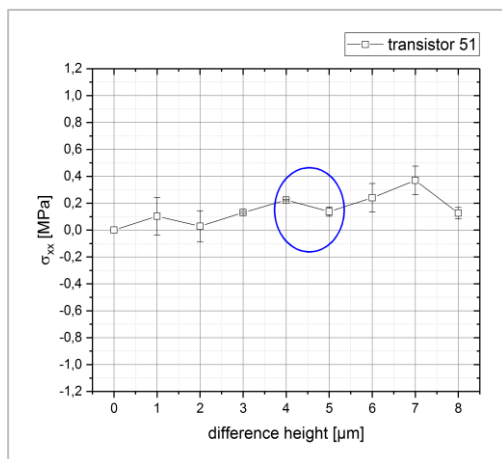


Abbildung 69: Änderung der Spannung von Transistor 51 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft

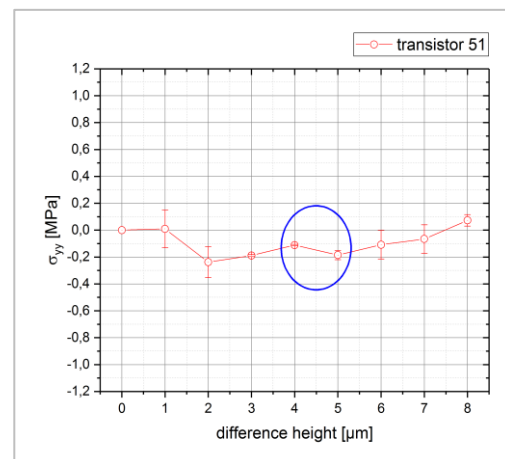


Abbildung 70: Änderung der Spannung von Transistor 51 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft

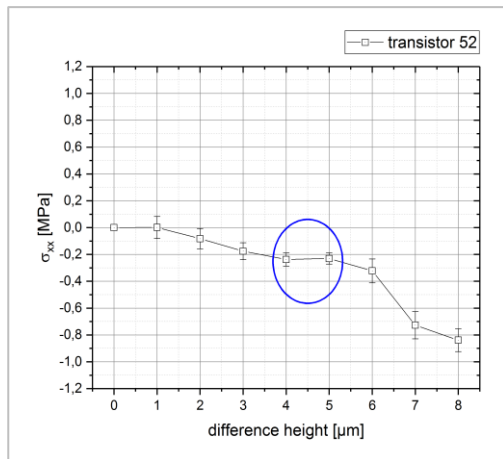


Abbildung 71: Änderung der Spannung von Transistor 52 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft

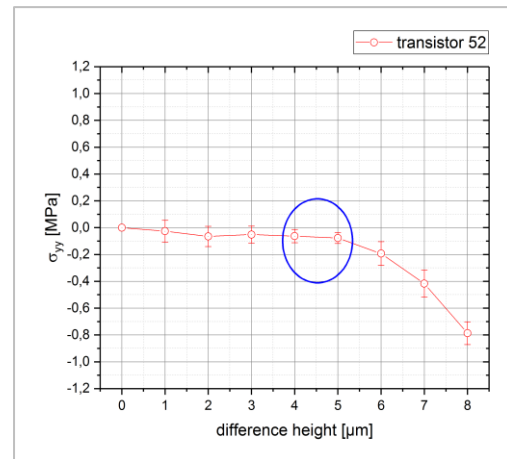


Abbildung 72: Änderung der Spannung von Transistor 52 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft

Zusätzlich fällt auf, dass die Kurven für die Spannungskomponenten in X- und Y-Richtung beider Chips bei einer Höhenänderung von 4 μm bis 5 μm einen Spannungsabfall zeigen (blaue Kreise in den Abbildungen 69 bis 72). Der mögliche Grund dafür ist das Nachgeben der Kontaktnadelspitze.

Darüber hinaus ist es ratsam die Nadel zwischen den drei Messungen, welche zur Erhöhung der Messgenauigkeit durchgeführt werden, nicht erneut aufzusetzen, damit sichergestellt werden kann, dass die Eindruckkraft bei allen drei Messungen gleich ist und somit auch vergleichbar ist.

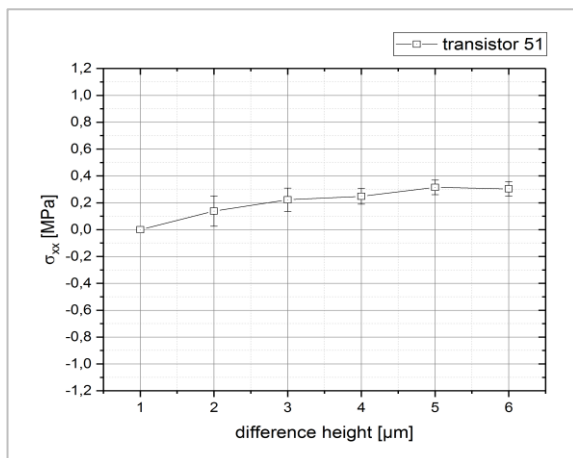


Abbildung 73: Änderung der Spannung von Transistor 51 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung

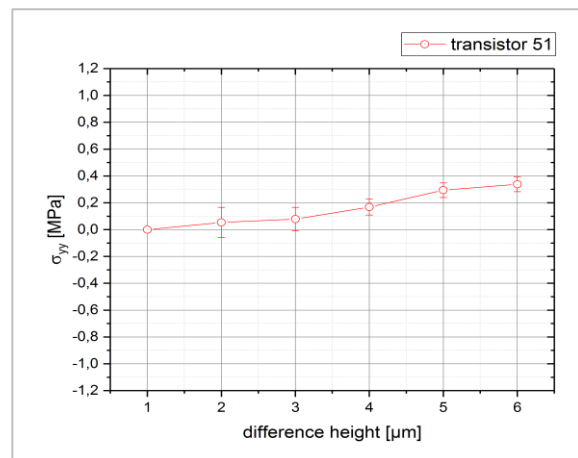


Abbildung 74: Änderung der Spannung von Transistor 51 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung

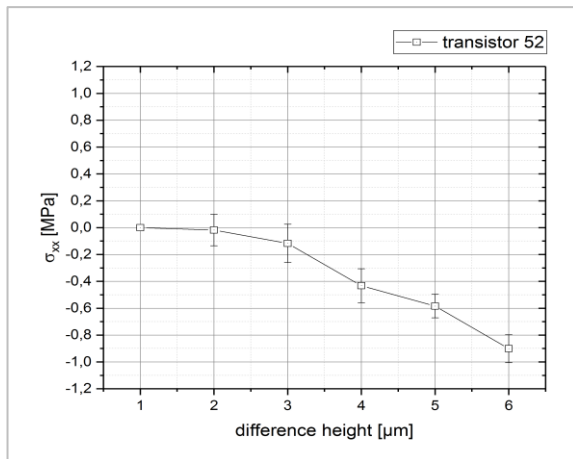


Abbildung 75: Änderung der Spannung von Transistor 52 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung

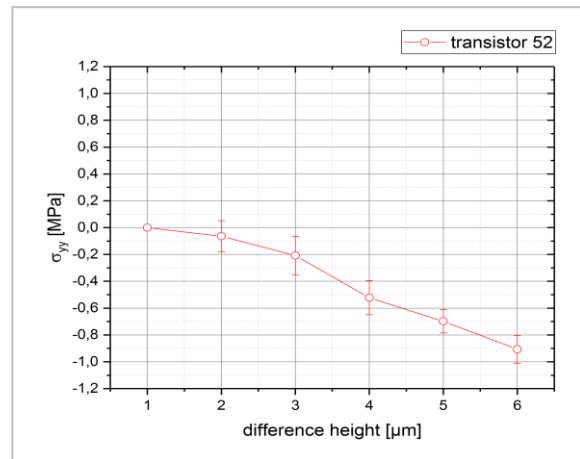


Abbildung 76: Änderung der Spannung von Transistor 52 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung

Die vorhergehenden Abbildungen 73 bis 76 zeigen die Änderungen der Spannungen in X- und in Y-Richtung an den jeweiligen Transistoren 51 und 52. Widererwartend sorgt die Kontaktierung in der Mitte des Pads in Y-Richtung nicht für die gewünschte Reduzierung des Einflusses des Kontaktierens auf die Spannung im Chip. Auffällig ist dabei, dass beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung die Spannungsänderung nach 6 μm Höhenänderung genauso groß ist, wie beim diagonalen Kontaktieren nach 8 μm Höhenänderung. Vergleicht man die Kurven aus beiden Experimenten miteinander, so erkennt man, dass bei dem Experiment, bei welchem ausschließlich in Y-Richtung kontaktiert wurde, kein Knick in den Kurven zu erkennen ist. Das bedeutet, dass die verwendete Nadel eine höhere Festigkeit besitzt und auch beim Erhöhen der Eindruckkraft nicht nachgegeben hat. Dieses Experiment bestätigt somit, dass es für eine hohe Messgenauigkeit zwingend notwendig ist, die Eindruckkraft der Nadel so gering wie möglich zu halten, da auch beim Kontaktieren in Y-Richtung der Einfluss des Kontaktierens eindeutig nachweisbar ist.

Bestimmung der Reihenfolge beim Auslesen der Transistoren

Zusätzlich bestätigen diese Messungen die zuvor angenommene Nummerierung 1 bis 60 der Transistoren zum Auslesen des Spannungsmesschips. Um diese Zuordnung der Spannungsmesschips nochmals zu bestätigen, wurde zusätzlich eine vertikale Reihe von fünf Indents in einem Abstand von 24 μm in der Nähe der unterschiedlichen Transistoren auf unterschiedlichen Chips gesetzt. Die fünf Indents sind jeweils in den Detail-Bildern oben links

in den Abbildungen 77 bis 80 zu sehen. Die Spannungsmesschips wurden dabei jeweils vor und nach der Indentierung gemessen und miteinander verglichen. Insgesamt wurden vier Spannungsmesschips indentiert. Vor dem Indentieren musste zunächst die Passivierung mittels Plasmaätzen entfernt werden, um die Siliziumoberfläche freizulegen, da ansonsten das Imid indentiert werden würde. Der Einfluss der Entfernung der Passivierung auf die Spannung im Chip wird in Kapitel 3.5.1. noch näher erläutert. Zum Indentieren wurden die Chips zusätzlich auf einem Aluminiumzylinder-Chuck mit Crystalbond geklebt. Um nur den Einfluss der Indentierung zu messen, wurde die Spannung erst direkt vor dem Versuch gemessen.

Die nachfolgenden Abbildungen 77 bis 80 zeigen die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} der beiden Chips 19 und 20 stellvertretend für die vier Spannungsmesschips. Beide Abbildungen zeigen die Differenz der Spannung vor dem Indentieren und nach dem Indentieren. Es geht daraus deutlich hervor, dass sich die gemessenen Spannungen an den jeweiligen Transistoren in der Nähe der Indents deutlich ändern. Dies gilt sowohl für die Spannung in X- als auch für die Spannung in Y-Richtung. Dieses Experiment bestätigt somit nochmals die angenommene Nummerierung 1-60 der Transistoren auf dem Spannungsmesschip.

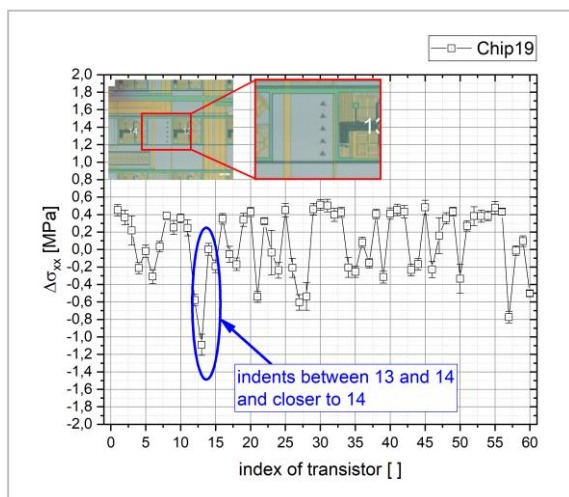


Abbildung 77: Differenz der gemessenen Spannungen in X-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 19

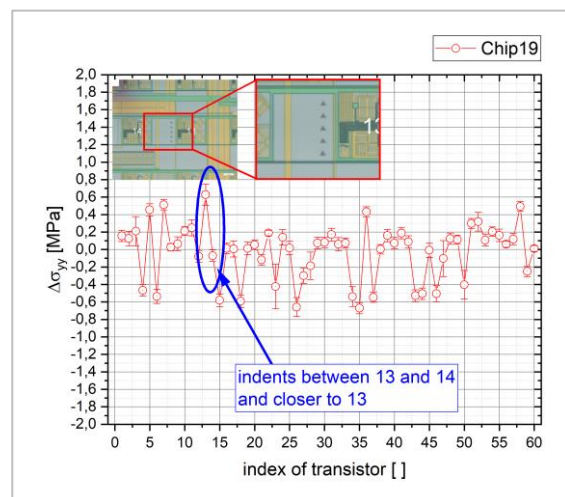


Abbildung 78: Differenz der gemessenen Spannungen in Y-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 19

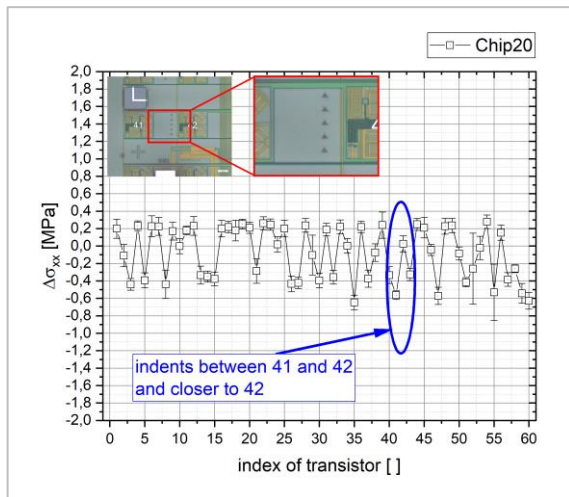


Abbildung 79: Differenz der gemessenen Spannungen in X-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 20

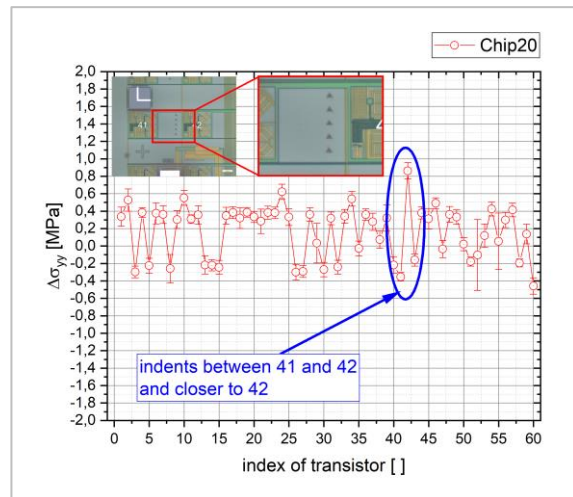


Abbildung 80: Differenz der gemessenen Spannungen in Y-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 20

3.4.2. Messsystem Spannungsmesschip

Wie bereits zuvor beschrieben, bestehen die Spannungsmesschips aus jeweils 60 Strommessspiegeln zur Spannungsdetektion. Um die Genauigkeit und die Stabilität der Chips zu bestimmen, wurde nach jedem Prozessschritt jeweils ein Chip zehn Mal gemessen. Dadurch ist es zusätzlich zur Messgenauigkeit der Chips möglich, eine Aussage darüber zu treffen, ob diese Messunsicherheit abhängig vom jeweiligen Prozessschritt der Chips ist.

Hierzu wurden die Chips mittels der vier Nadeln kontaktiert. Während der gesamten zehn Messungen wurden die Nadeln nicht mehr verändert, um ausschließlich die Messunsicherheit der einzelnen Messspiegel zu bestimmen.

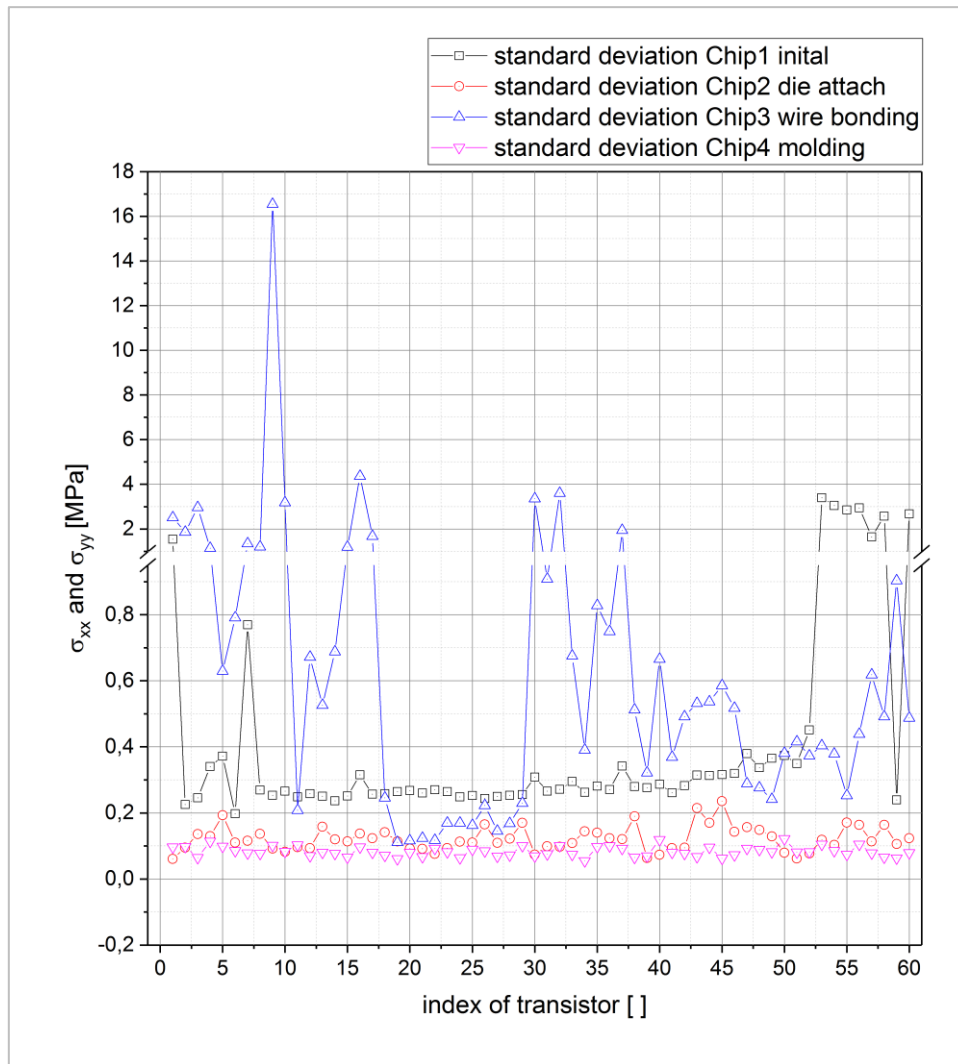


Abbildung 81: Vergleich der Standardabweichungen bei zehn Messungen auf dem gleichen Chip

Die Abbildung 81 zeigt die Standardabweichungen von zehn piezo-resistiven elektrischen Messungen auf ein und demselben Chip, wobei für die unterschiedlichen Prozessschritte jeweils verschiedene Spannungsmesschips verwendet wurden. Aus dem Graphen geht hervor, dass der Spannungsmesschip im nicht aufgebauten Zustand und der Spannungsmesschip nach dem Wirebond-Prozess die größten Standardabweichungen besitzen. Bei dem Chip im Grundzustand ist die Standardabweichung der Transistoren 53 bis 60 mit 1,8 MPa bis 3,8 MPa am höchsten. Ein möglicher Grund dafür ist die Kontaktierung zum elektrischen Auslesen der Chips, da die Chips zwar während der zehn Messungen auf dem Chuck fixiert waren, jedoch konnte beobachtet werden, dass die Chips unter dem Druck der Kontaktnadeln leicht wegdriften. Darüber hinaus gaben die Spitzen der Kontaktnadeln leicht nach. Wie im vorhergehenden Kapitel 3.4.1. „Messsystem Nadeltester“ bereits gezeigt, kann beides dazu

führen, dass die Eindruckkraft der Nadeln mit steigender Anzahl der Messungen abnimmt und somit eine höhere Standardabweichung entsteht. Die Schwankungen auf den Chip nach dem Wirebond-Prozess sind hauptsächlich bei den Transistoren 1-10 und 55-60 am höchsten. Das sind die Transistoren, welche sich in der Nähe der Kontaktpads befinden auf denen die Wirebonds gesetzt wurden. Da sich die Wirebonds mittig auf den Kontaktpads befinden, war es nur möglich die Chips ziemlich weit am Rand der Kontaktpads zu kontaktieren. Die vorangegangene Untersuchung zeigt, dass die Position der Nadel auf dem Kontaktpad während des Kontaktierens einen großen Einfluss auf die gemessenen Spannungen der in der Nähe liegenden Transistoren hat. Ein weiterer möglicher Grund für die Schwankungen auf dem Chip nach dem Wirebond-Prozess ist, dass durch die Kontaktierung mit dem Leadframe, ein Teil des Stromes über das Leadframe verloren geht. Bei Strömen im Bereich von 100 μA haben bereits kleine Schwankungen einen sehr großen Einfluss. Die Standardabweichungen beim Chip nach dem Die Attach und nach dem Molding zeigen sehr geringe Werte. Die geringsten Schwankungen der gemessenen Spannungswerte zeigt der Chip nach dem Mold-Prozess. Begründet kann das dadurch werden, dass der Chip nicht mehr auf den Kontaktpads kontaktiert wird, sondern über die Leads weit außerhalb des Chips. Somit hat das Kontaktieren keinen Einfluss mehr auf die Spannungen im Chip. Außerdem ist der Chip durch den Mold-Prozess von äußeren Einflüssen abgeschirmt und Einflüsse wie beispielsweise Licht oder kleinere Schwankungen in der Temperatur haben, wenn überhaupt, nur noch einen sehr geringen Einfluss auf den Chip.

3.4.3. Biegeversuch

Der Biegeversuch war notwendig, um den Chip und seine gemessene intrinsische Spannung sowie ihre Richtung auf Richtigkeit zu überprüfen. Dadurch sollte herausgefunden werden, ob die durch den Biegeversuch auf den Chip eingebrachte Spannung auch der Spannung entspricht, die durch das elektrische Auslesen des piezo-resistiven Koeffizienten bestimmt wurde. Zudem sollte überprüft werden, ob der gemessene Spannungsverlauf auf dem Chip auch mit dem durch die Biegung erzeugten Spannungsverlauf übereinstimmt.

Abbildung 82 zeigt die schematische Darstellung des Messaufbaus. Auf einem dünnen Wafer, welcher als Träger fungiert, wurden fünf Spannungsmesschips aufgeklebt. Als Kleber wurde hier sogenannter Crystalbond verwendet, da dieser nach dem Aushärten die nötige Steifigkeit besitzt, um die durch die Biegung des Wafers erzeugte Spannung gut auf den Chip zu übertragen. Die Chips selber wurden so auf dem Trägerwafer platziert, dass sich vom mittleren

Chip sowohl in positiver als auch in negativer X- und Y-Richtung jeweils ein Chip befindet. Dadurch wurden die Spannungen in die entsprechenden Richtungen gut abgebildet.

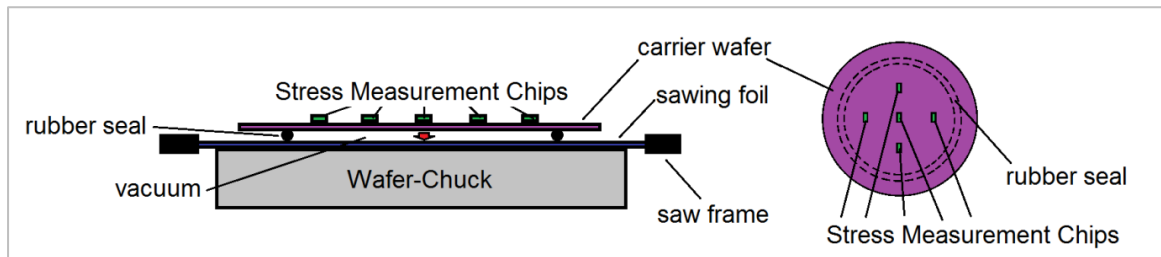


Abbildung 82: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus des Biegeversuchs

Die Biegung des Wafers wurde durch einen Unterdruck erzeugt, welcher in dem Raum zwischen Trägerwafer, Dichtring und Waferchuck entstanden ist. Dafür wurde ein Druckregler verwendet, der es möglich macht, in diesem Raum einen definierten Unterdruck zu erzeugen. Der Druckregler war wiederum an der Vakuumbauleitung angeschlossen.

Zunächst wurde nur der mittlere Spannungsmesschip betrachtet und die Spannungsänderungen in Abhängigkeit von dem jeweils eingestellten Unterdruck bestimmt. Als Referenz wurde der Chip ohne angelegten Unterdruck gemessen.

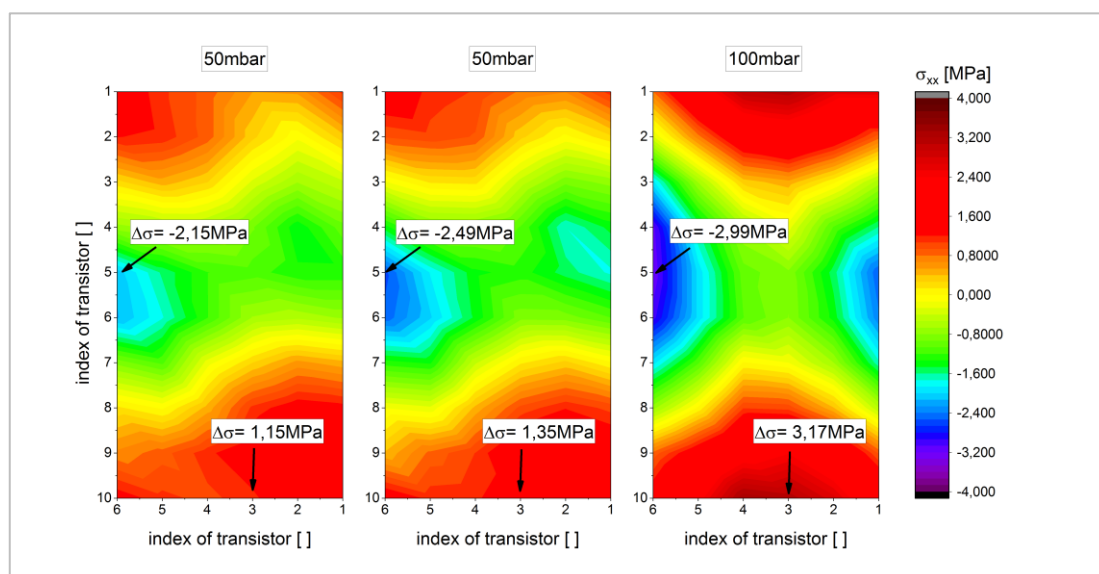


Abbildung 83: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} gemessen bei verschiedenen Druckeinstellungen im Vergleich zur Referenzmessung; Zusätzlich dargestellt sind die Unterschiede in den Differenzen an markanten Punkten

Danach wurde ein Unterdruck von 50 mbar, 70 mbar und 100 mbar am Druckregler eingestellt. Die Spannungsänderungen der Spannungskomponente σ_{xx} bei unterschiedlichen Druckeinstellungen sind in der Abbildung 83 und die Spannungsänderungen der Spannungskomponente σ_{yy} in Abbildung 84 dargestellt. Betrachtet man die Spannungskomponente σ_{xx} bei verschiedenen Drücken, so fällt auf, dass das Spannungsbild mit steigendem Unterdruck immer symmetrischer wird. Des Weiteren erkennt man, dass sich gewisse Bereiche immer stärker ausbilden. So wird beispielsweise der rote Spannungsbereich bei einem Unterdruck vom 50 mbar oben links auf dem Chip immer größer und nimmt bei 100 mbar die ganze obere Seite des Chips ein. Das bedeutet, dass der Bereich mit steigenden Spannungswerten immer größer wird. Ähnlich verhält es sich mit dem blauen Spannungsbereich an der linken langen Seite des Chips. Das sind auch die Bereiche, in denen die Spannungen zumindest für Druckspannungen größer werden. Die eingezeichneten Werte in den beiden Bereichen zeigen, dass der Spannungswert immer größer wird. Der Anstieg dieser Werte ist dabei nicht linear, da der Sprung beim Übergang von 75 mbar auf 100 mbar größer als von 50 mbar auf 75 mbar ist. Am deutlichsten wird das im roten Spannungsbereich ersichtlich. Dort steigen die Werte von 50 mbar auf 75 mbar um 0,2 mbar und von 75 mbar auf 100 mbar um 1,82 mbar.

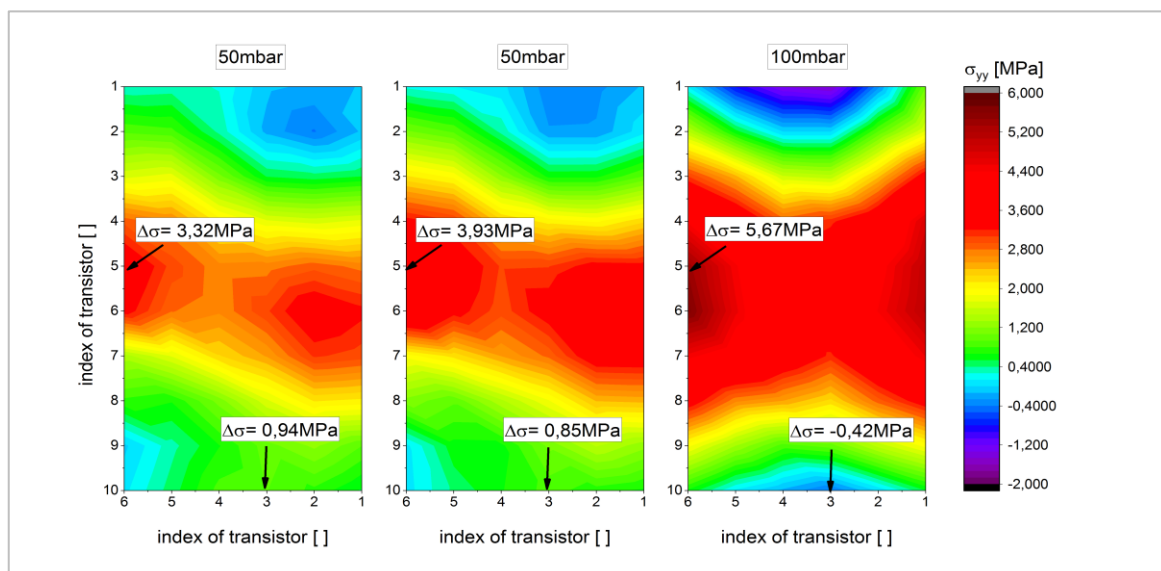


Abbildung 84: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} gemessen bei unterschiedlichen Druckeinstellungen im Vergleich zur Referenzmessung; Zusätzlich dargestellt sind die Unterschiede in den Differenzen an markanten Punkten

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Spannungsmesschip durch die extern eingebrachte Verbiegung in X-Richtung an den kurzen Seiten auf Zug beansprucht und an den langen Seiten auf Druck beansprucht wird. Die Mitte des Chips ist der Bereich, bei welchem sich die Spannung durch die externe Biegung am geringsten ändert.

Wie aus Abbildung 84 hervorgeht, wird der Spannungsverlauf in Y-Richtung mit steigendem Unterdruck, ebenso wie in X-Richtung, immer symmetrischer. Bei der Spannungskomponente σ_{yy} sind die Bereiche des Chips, bei welchen die Spannungen im Zugspannungsbereich größer werden, an den langen Chipseiten (rote Bereiche).

Der Grund für das gegengesetzte Vorzeichen bei den Spannungskomponenten in X- und in Y-Richtung liegt an der kristallinen Struktur des Siliziums und das damit verbundene Verhalten, dass eine Streckung des Kristalls in eine Koordinatenrichtung meist eine Stauchung des Kristalls in der anderen Koordinatenrichtung zur Folge hat.

Auch beim Spannungsverlauf in Y-Richtung fällt auf, dass die Differenz zwischen den Spannungswerten an den definierten Stellen zwischen 75 mbar und 100 mbar größer ist (roter Spannungsbereich: 1,74 MPa und blauer Spannungsbereich: 1,27 MPa) als die Differenz zwischen 50 mbar und 75 mbar (roter Spannungsbereich: 0,61 MPa und blauer Spannungsbereich: 0,09 MPa). In beiden Fällen kann dafür der Grund sein, dass das Silizium im Spannungs-Dehnungs-Diagramm nicht mehr im linearen (elastischen) Bereich, sondern im nichtlinearen (elastisch-plastischen) Bereich ist. Des Weiteren ist es auch möglich, dass der Crystalbond die nicht lineare Spannungsänderung hervorruft.

Im Anschluss an die Einzelbetrachtungen werden nun alle fünf Spannungsmesschips untersucht, um die Spannungsrichtungen auf den Chips zu überprüfen. Dazu wurde ein konstanter Unterdruck von 100 mbar eingestellt. Durch den entstehenden Unterdruck unter dem Trägerwafer kommt es zu einer konkaven Verbiegung.

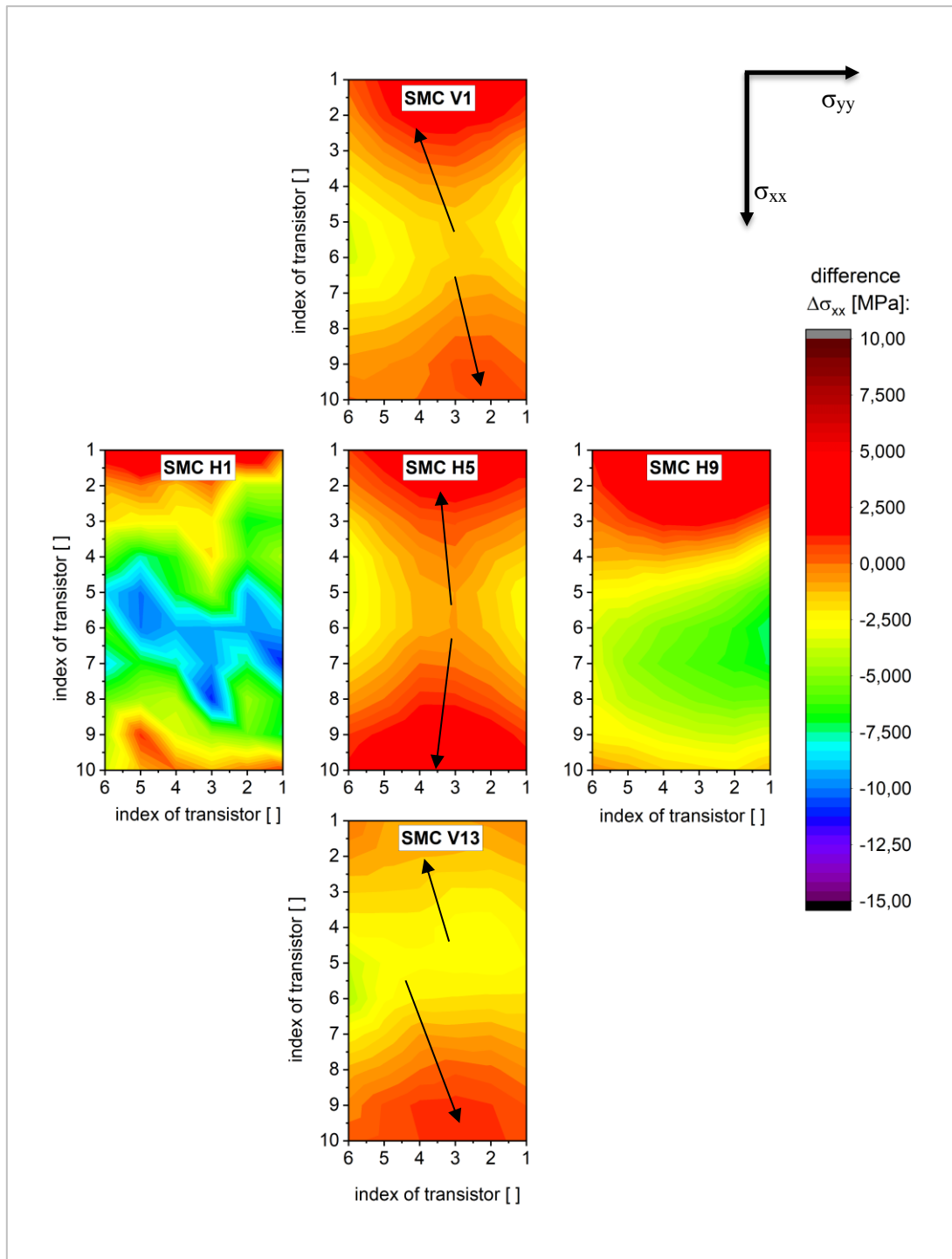


Abbildung 85: Darstellung der Spannungen in X-Richtung der fünf Spannungsmesschips, welche sich auf dem Trägerwafer befinden

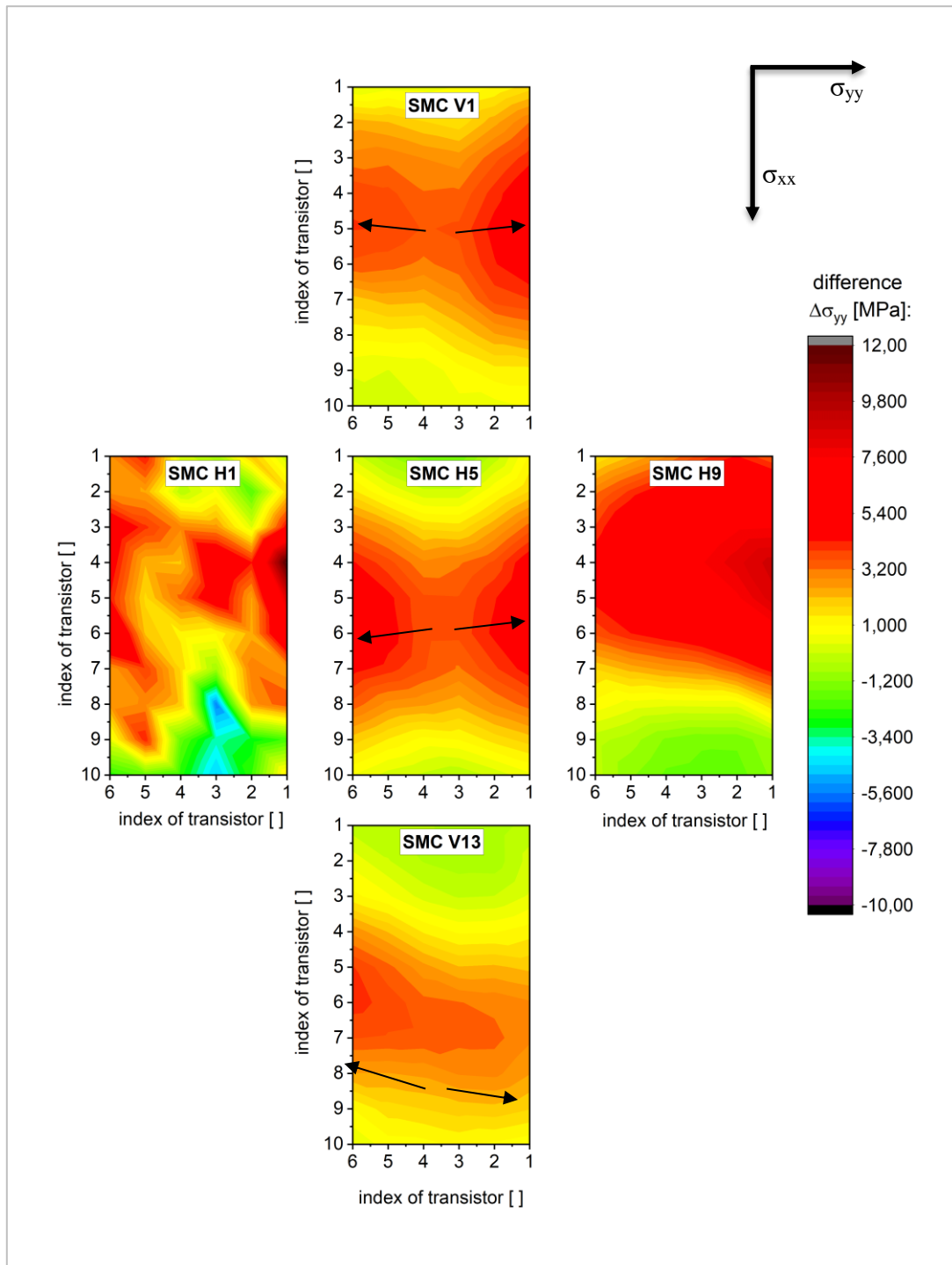


Abbildung 86: Darstellung der Spannungen in Y-Richtung der fünf Spannungsmesschips, welche sich auf dem Trägerwafer befinden

Die Darstellungen in den beiden Abbildungen 85 und 86 zeigen die jeweiligen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} der fünf Spannungsmesschips. Dabei stellen die Positionen der Chips in den Abbildungen auch die Positionen auf dem Trägerwafer dar.

Wie bereits im vorherigen Einzelversuch mit der Variation des Drucks dargestellt, zeigt der mittlere Spannungsmesschip SMCH5 sowohl in X- als auch in Y-Richtung ein symmetrisches Spannungsmuster. Das bedeutet, dass er im Zentrum der Verbiegung steht und demnach auch mittig auf dem Trägerwafer aufgeklebt wurde. Er besitzt in X-Richtung jeweils am äußersten Rand der kurzen und der langen Seiten die größte Spannungsdifferenz. Dort ändert sich die mechanische Spannung um 3 MPa (Abbildung 85). Der Spannungsmesschips zeigt vor dem Biegeversuch hauptsächlich Zugspannungen (gelb bis dunkelrot). Nach dem Biegeversuch werden vor allem die Bereiche mit Zugspannungen am oberen Rand des Chips größer. Zusätzlich fällt auf, dass die Bereiche mit Druckspannungen (hellblau bis violett) am rechten Rand des Chips ebenfalls größer werden. Der Wert für die Druckspannung nimmt dort zu (Abbildung 87). Vor dem Biegeversuch haben die Druckspannungen einen Wert von -8 MPa bis -10 MPa und nach dem Biegeversuch -10 MPa bis -13 MPa.

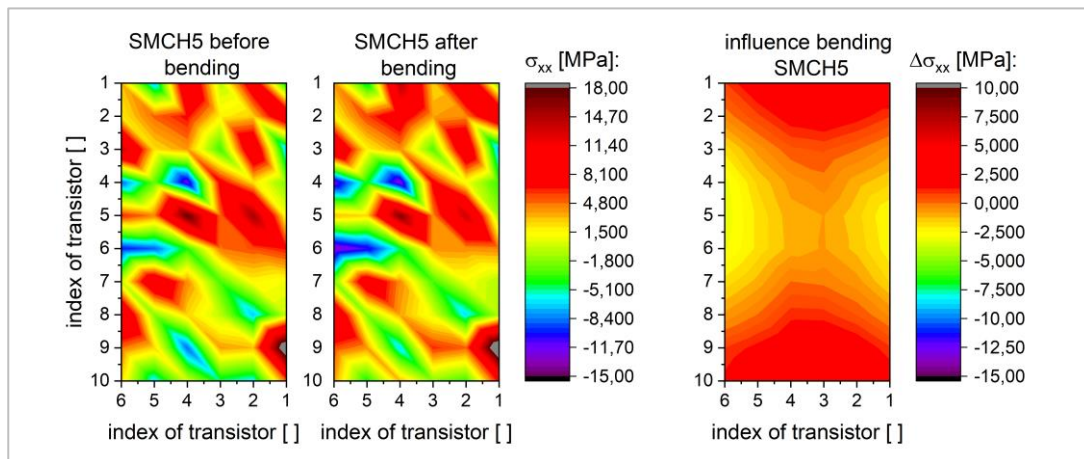


Abbildung 87: Einfluss der Waferbiegung auf den oberen Spannungsmesschip SMCH1 in X-Richtung

Die Chips ober- und unterhalb des mittleren Spannungsmesschips (SMCV1 und SMCV13) zeigen eine asymmetrische Spannungsänderung. Das Spannungsbild des oberen Chips SMCV1 lässt schlussfolgern, dass er sich links von der vertikalen Spannungsachse befindet. Der Grund für diese Vermutung ist, dass der orange Spannungsbereich (0,3 MPa) nicht in der Mitte liegt, sondern nach rechts verschoben ist. Zudem fehlt der rote Spannungsbereich (3 MPa) im unteren Teil des Spannungsmesschips komplett.

Der untere Chip SMCV13 befindet sich rechts von der vertikalen Spannungsachse, da hier der orange Spannungsbereich an der oberen Kante des Chips nach links verschoben ist. Ähnlich wie auf dem Chip SMCV1 fehlt auch hier der rote Spannungsbereich an der oberen Seite

komplett. Im Vergleich zum oberen Chip ist der orange Spannungsbereich sehr viel kleiner und damit der rote Spannungsbereich größer. Beide Chips weisen mit 3 MPa an den schmalen Seiten die größten Spannungsänderungen auf. Dabei ist die Zugspannung lediglich im oberen Bereich des Chips SMCV1 nach dem Biegeversuch größer geworden. Auf dem restlichen Chip SMCV1 sind die Druckspannungen größer geworden und auch der Flächenanteil dieser ist angestiegen (Abbildung 88).

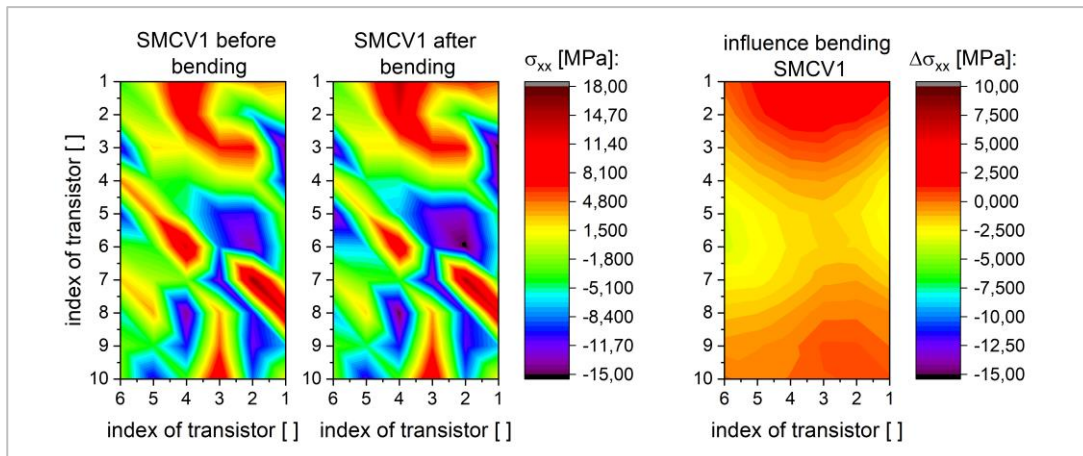


Abbildung 88: Einfluss der Waferbiegung auf den oberen Spannungsmesschip SMCV1 in X-Richtung

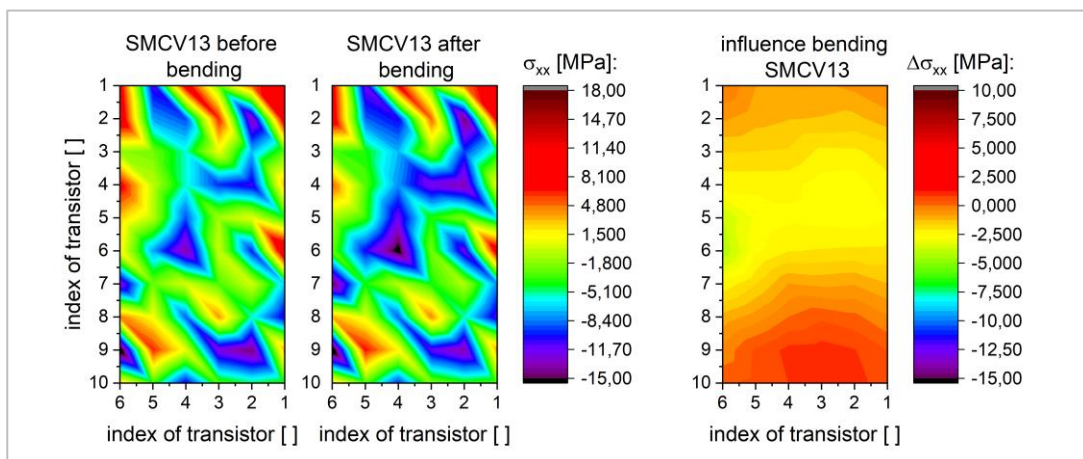


Abbildung 89: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV13 in X-Richtung

In Abbildung 89 ist der Einfluss der Waferbiegung auf dem unteren Spannungsmesschip SMCV13 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass der Chip, ähnlich dem Chip SMCV1, vor dem Biegeversuch bereits zum größten Teil Druckspannungen mit -3 MPa bis - (grün bis violett) zeigt. Es sind nur vereinzelt Bereiche zu sehen, welche Zugspannungen (orange bis rot) zeigen.

Diese befinden sich hauptsächlich an der oberen und linken Seite des Chips SMCV13. Die mechanische Spannung liegt in diesen Bereichen bei 1 MPa bis 10 MPa. Nachdem der Wafer verbogen wurde, wird auch auf dem Chip SMCV13 die Oberfläche stärker Druck verspannt. Deutlich wird dies an den blauen bis violetten Bereichen, welche nach dem Biegeversuch größer geworden sind. Im Gegensatz dazu, bleiben die Flächenanteile der Zugspannung unverändert. Ein weiterer Grund für den nicht symmetrischen Spannungsverlauf der Spannungsmesschips SMCV1 und SMCV13 kann auch eine nicht symmetrisch verlaufende mechanische Spannung sein. Dieses kann zum Beispiel auftreten, wenn der Trägerwafer nicht exakt zentrisch auf dem Dichtring liegt.

Bei den Spannungsmesschips, welche links (SMCH1) und rechts (SMCH9) angeordnet sind, befinden sich die maximalen positiven Spannungsänderungen an den oberen kurzen Seiten. Der Wert der Spannung beim Chip SMCH1 beträgt 5,3 MPa und liegt beim Chip SMCH9 bei 4,75 MPa (Abbildung 90 und 91). Auf dem Chip SMCH1 befindet sich die maximale negative Spannungsänderung mit einem Wert von -9 MPa bis -11 MPa (hellblau) in der Mitte des Chips (Abbildung 90).

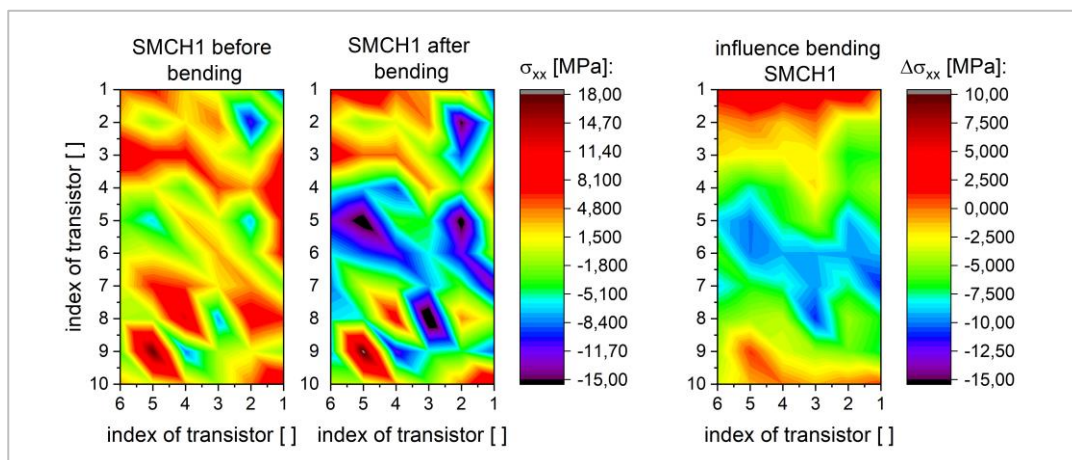


Abbildung 90: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in X-Richtung

In Abbildung 90 ist zudem zu erkennen, dass der Spannungsmesschip vor dem Biegeversuch in der Mitte leichte Druckspannungen zeigt. Die Spannungswerte in diesen Bereichen liegen zwischen -3 MPa (grün) und -8 MPa (blau). Im oberen Bereich und an den Rändern besitzt der Spannungsmesschip SMCH1 hauptsächlich Zugspannungen mit Werten zwischen 1 MPa (gelb) und 17 MPa (dunkelrot). Nachdem der Trägerwafer gebogen wurde, ändern sich die mechanischen Spannungen in der Mitte des Chips sehr stark. Der Anteil an Druckspannungen

nimmt hier zu und die Werte für die Druckspannungen steigen auf -7 MPa (blau) bis -18 MPa (schwarz).

Die Abbildung 91 zeigt den Einfluss des Biegeversuchs auf den Spannungsmesschip SMCH9. Die maximale negative Spannungsänderung auf dem Chip SMCH9 ist im Vergleich zum Chip SMCH1 kleiner. Diese liegt zwischen den Spannungswerten von -6 MPa (grün) und -7,5 MPa (hellblau). Vor dem Biegeversuch zeigt der Spannungsmesschip hauptsächlich Zugspannungen mit Werten von 3 MPa (gelb) bis 18 MPa (dunkelrot). Diese Bereiche sind zum Großteil in der Mitte des Chips zu finden. Lediglich vereinzelt sind Bereiche mit Druckspannungen zu finden, wie zum Beispiel an der rechten Seite des Chips. Dort liegt der Spannungswert bei -10 MPa (blau) bis -20 MPa (schwarz). Nach dem Biegeversuch nimmt der Anteil der Zugspannungsbereiche stark ab. Die Werte für die Zugspannung in der Mitte des Chips liegen nur noch in einem Bereich von 1 MPa (gelb) bis 14 MPa (rot). Dafür sind die Flächenanteile der Druckspannung größer geworden und die Druckspannung ist mit Werten von -8 MPa (hellblau) bis -20 MPa (schwarz) angestiegen. Am deutlichsten wird das an der rechten Seite und an der unteren Seite des Spannungsmesschips SMCH9 ersichtlich.

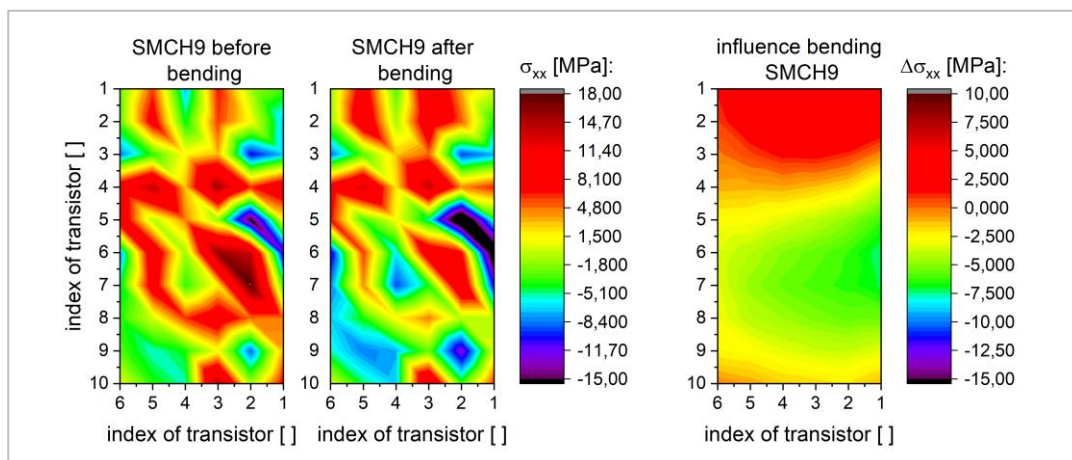


Abbildung 91: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH9 in X-Richtung

Analog zur Darstellung der Spannung in X-Richtung (Abbildung 85), in welcher der Chip SMCH5 als einziger ein symmetrisches Spannungsbild zeigt, geht auch aus der Darstellung der Spannung in Y-Richtung (Abbildung 86) hervor, dass dieser Chip der einzige mit symmetrischem Spannungsbild ist. Die Abbildung 92 zeigt den Einfluss des Biegens auf die mechanische Spannung. Bevor der Trägerwafer gebogen wurde, ist der Chip SMCH5 zum größten Teil in Y-Richtung Druck verspannt. Die Werte für die Druckspannung liegen im

Bereich von -3 MPa (grün) bis -18 MPa (schwarz). Lediglich in der Mitte und vereinzelte Bereiche am Rand zeigen Zugspannungen von 2 MPa (gelb) bis 25 MPa (grau). Die Werte für die Zugspannung auf diesem Chip sind vergleichsweise hoch. Nach dem Biegen werden die Zugspannungsbereiche größer und auch die Werte steigen an. So nimmt der Wert in der unteren rechten Ecke auf 27 MPa zu und die Zugspannungswerte in der Mitte des Chips steigen von 13 MPa vor dem Biegen auf 18 MPa nach dem Biegen. Das zeigt auch die Differenz zwischen der mechanischen Spannung vor und nach dem Biegen im rechten Bild in der Abbildung 92. Dort ist zu sehen, dass die größten Spannungsdifferenzen in der Mitte des rechten und linken Randes zu finden sind.

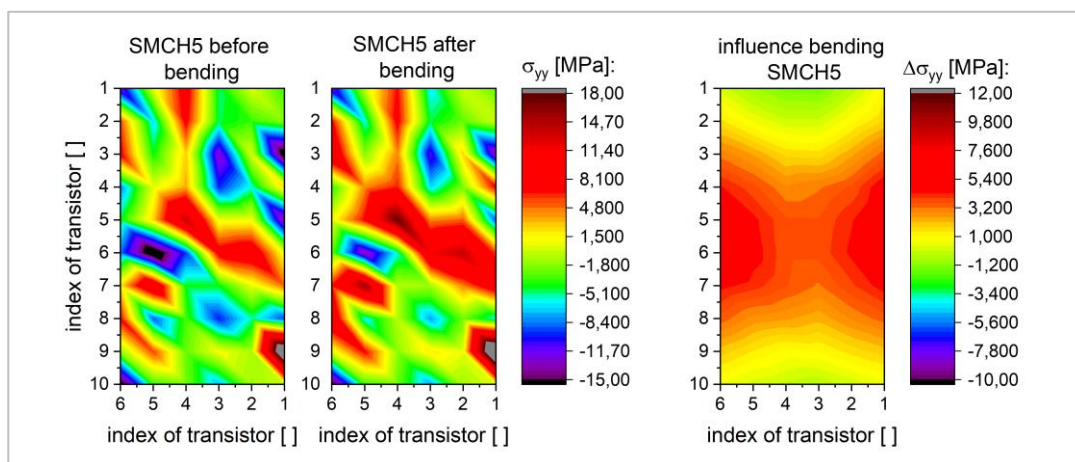


Abbildung 92: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH5 in Y-Richtung

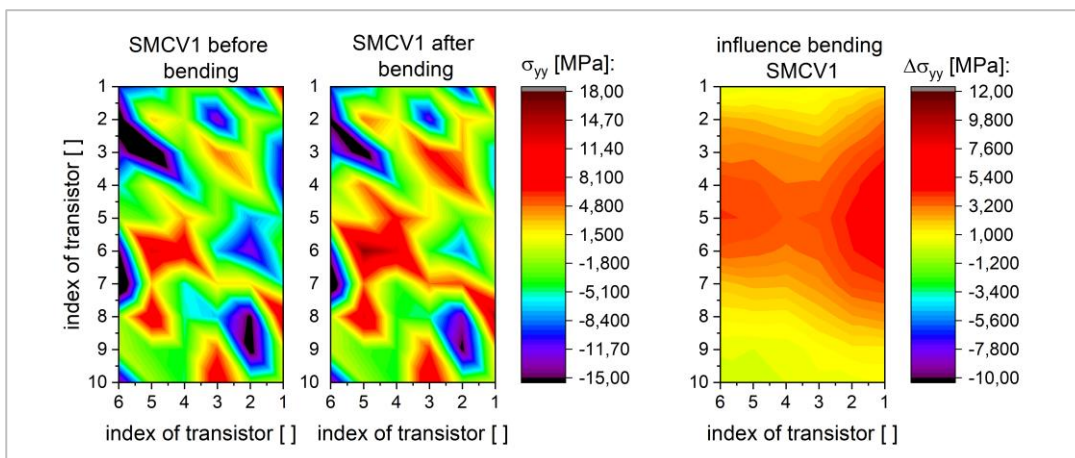


Abbildung 93: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV1 in Y-Richtung

Der Einfluss der Biegung auf die mechanische Spannung in Y-Richtung vom oberen Chip ist in Abbildung 93 zu sehen. Die Oberfläche des Spannungsmesschip SMCV1 zeigt, ähnlich wie alle anderen Chips, in Y-Richtung zunächst überwiegend Druckspannung. Diese liegen im Bereich von -8 MPa (hellblau) und -23 MPa (schwarz).

Der linke Rand und die rechte untere Ecke des Chips zeigen dabei mit bis zu -23 MPa (schwarz) die höchsten Druckspannungswerte. In der Mitte ist der Chip vor dem Biegeversuch Druck verspannt. Die gelben bis dunkelroten Bereiche zeigen Spannungswerte zwischen 2 MPa und 13 MPa. Wie aus dem rechten Bild in Abbildung 93 hervor geht, sind die größten Änderungen der mechanischen Spannung nach dem Biegeversuch am rechten Rand und in der Mitte der Spannungsmesschips zu erkennen. Am rechten Rand verschwindet der Druckspannungsbereich fast komplett. Hier vergrößern sich die Spannungswerte von bis zu -13 MPa (violett) auf bis zu -9 MPa. Der Flächenanteil der Druckspannung am rechten Rand nimmt stark ab. Generell nimmt der Flächenanteil der Zugspannung auf dem Chip SMCV1 zu. In der Mitte des Chips steigt der Wert der Zugspannung von 13 MPa (dunkelrot) vor dem Biegeversuch auf 16 MPa (dunkelrot) nach dem Biegeversuch an. Am oberen Rand und in der unteren linken Ecke bleiben die mechanischen Spannungen nahezu unverändert. Hier beträgt die Differenz zwischen der mechanischen Spannung vor und nach dem Biegen lediglich -0,05 MPa bis 0,1 MPa.

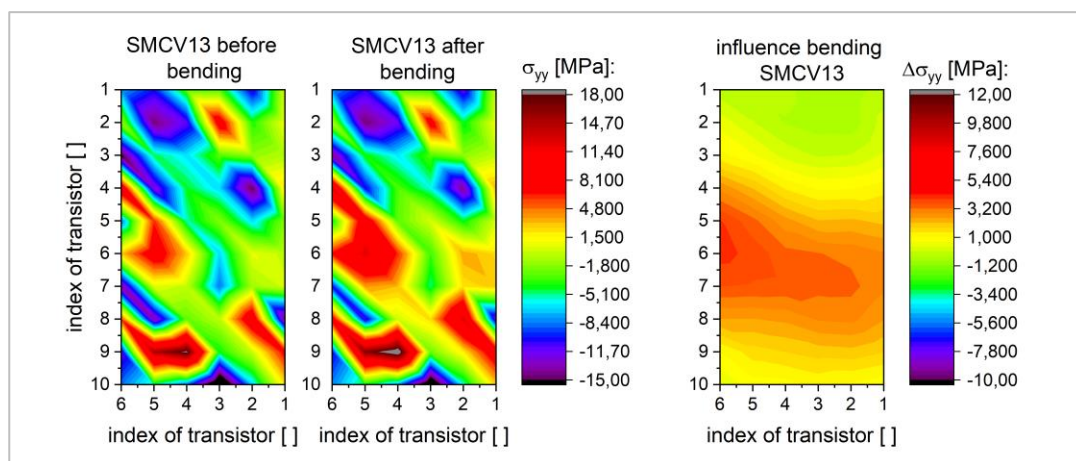


Abbildung 94: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV13 in Y-Richtung

Die Differenz der mechanischen Spannung vor und nach dem Biegeversuch im rechten Bild in Abbildung 94 zeigt, dass sich die Spannung auf dem oberen Drittel des Spannungsmesschips kaum verändert. Die Änderungen liegen zwischen -0,05 MPa und 0,5 MPa. Auch hier zeigt die Oberfläche des Spannungsmesschips vor dem Biegeversuch hauptsächlich Druckspannungen.

Diese befinden sich hauptsächlich im oberen Bereich und an der linken Seite sowie an der unteren Seite des Chips. Die Werte der Druckspannung auf der Chipoberfläche liegen in diesen Bereichen zwischen -6 MPa (hellblau) und -15 MPa (violett). Das Maximum der Zugspannung befindet sich im unteren Teil des Chips und besitzt einen Spannungswert von 19 MPa (grau). Nach dem Biegeversuch nimmt der Flächenanteil der Zugspannung auf der unteren Hälfte des Spannungsmesschips stark zu. Auch die Spannungswerte der Zugspannung steigen von 2 MPa (gelb) bis 19 MPa (grau) auf 3 MPa (gelb) bis 20 MPa (grau).

Die Chipoberfläche des Chips SMCH1 zeigt in Y-Richtung zum Großteil Druckspannungen. Diese befinden sich hauptsächlich in der Mitte des Chips und liegen zwischen -5 MPa (hellblau) und -15 MPa (schwarz). Nach dem Biegeversuch steigt zwar die Druckspannung im unteren Teil des Chips auf -20 MPa an, dennoch nimmt der Flächenanteil der Druckspannung auf dem Chip ab. Gleichzeitig werden die Flächen mit Zugspannungen größer, wie zum Beispiel am oberen Rand und in der unteren linken Ecke zu sehen ist. Die Werte der Druckspannung liegen zwischen 3 MPa (gelb) und 17 MPa (dunkelrot). Die Differenz zwischen der mechanischen Spannung vor und nach dem Biegeversuch ist im rechten Bild der Abbildung 95 zu sehen. Daraus geht hervor, dass die größte Änderung mit 12 MPa (dunkelrot) am rechten Rand der Spannungsmesschips zu finden ist.

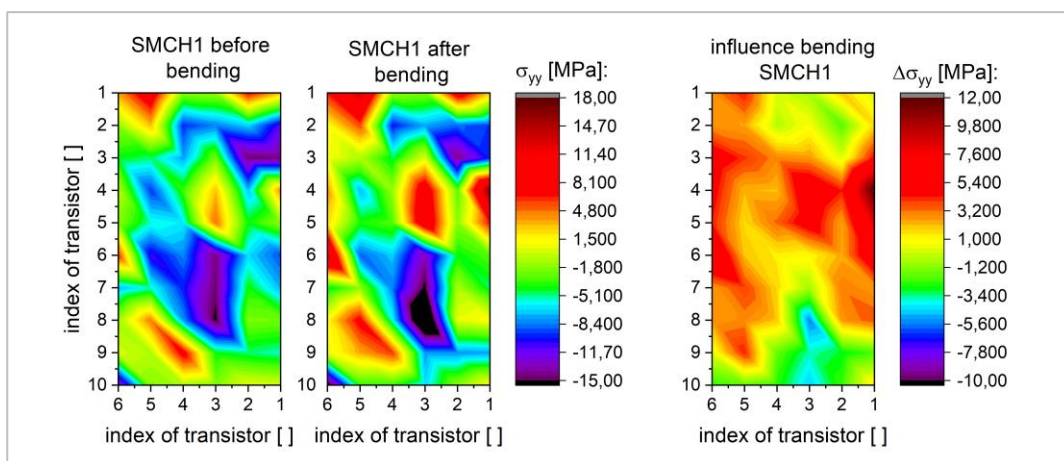


Abbildung 95: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in Y-Richtung

Das rechte Bild in Abbildung 96 zeigt, dass sich die mechanische Spannung vor und nach dem Biegeversuch auf einer Fläche der oberen zweidrittel des Chips SMCH9 ändert. Der Rest bleibt mit Differenzen zwischen 0,4 MPa und -1,7 MPa nahezu unverändert. Das wird auch deutlich, wenn man sich die beiden linken Bilder ansieht. Vor dem Biegeversuch zeigt die Oberfläche

des Spannungsmesschips SMCH9 zum größten Teil Druckspannungen am linken und rechten Rand. Die Werte der Druckspannung liegen zwischen -6 MPa (hellblau) und -24 MPa (schwarz). Es gibt nur vereinzelt Bereiche, welche Zugspannungen zeigen. Diese liegen zwischen 3 MPa (gelb) und 8 MPa (rot). Nach dem Biegeversuch nehmen die Bereiche mit Zugspannung vor allem in der oberen Hälfte des Chips stark zu und die Spannungswerte steigen dort auf 4 MPa (gelb) bis 13 MPa (dunkelrot). Gleichzeitig nimmt der Flächenanteil der Druckspannung bei diesen Bereichen ab. Die Werte der Druckspannung sinken auf -5 MPa (hellblau) bis -16 MPa (schwarz).

Aus den Abbildungen 85 und 87 bis 91 geht hervor, dass alle fünf Spannungsmesschips nach dem Biegen der Trägerwafers in X-Richtung einen deutlich höheren Flächenanteil an Druckspannungen zeigen.

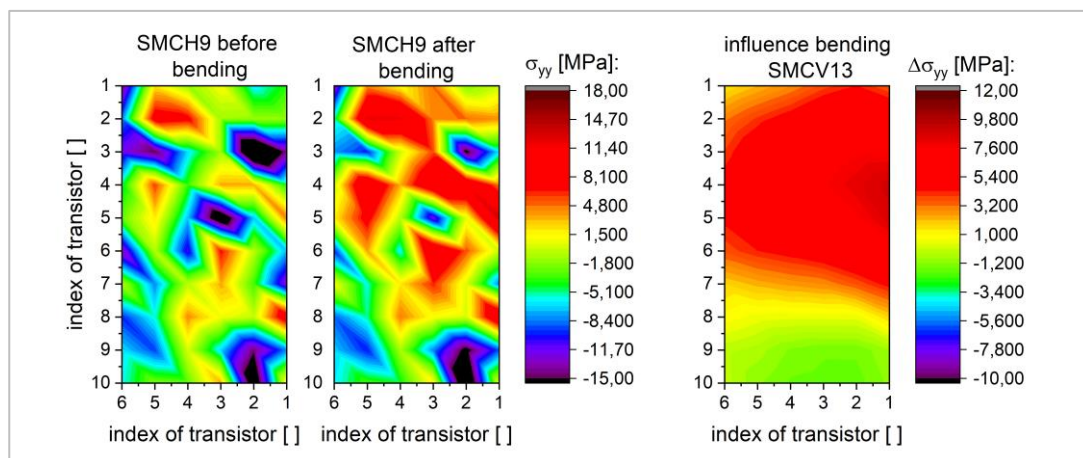


Abbildung 96: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in Y-Richtung

Zusätzlich sind die Werte der Druckspannung nach dem Biegen angestiegen. Dies stimmt auch mit der Biegung des Wafers in dem Bereich überein, in welchem die Spannungsmesschips aufgeklebt sind, da dieser Teil des Trägerwafers innerhalb des Dichtrings liegt und sich dadurch konkav verbiegt. Das führt zu einer Druckspannung an der Oberseite des Trägerwafers und dies wiederum zur vermehrt gemessenen Druckspannung auf der Oberfläche des Spannungsmesschips.

Bis auf den Spannungsmesschip SMC5, welcher sich in der Mitte des Wafers befindet, zeigen alle anderen Chips sowohl in X-Richtung als auch in Y-Richtung asymmetrische Spannungsbilder. Das deutet darauf hin, dass der Wafer entweder leicht auf dem Dichtring

verschoben wurde oder der Dichtring nicht kreisrund ist und sich dadurch der Wafer nicht symmetrisch verbiegt.

Der Flächenanteil der Spannung in Y-Richtung nimmt hauptsächlich in der Mitte des Chips zu. Dort ist auch die Spannungsdifferenz am größten (roter Bereich). Die Werte der Zugspannungen in diesen Bereichen nehmen zu. Die restliche Oberfläche des Chips zeigt kaum Spannungsdifferenzen (grüner Bereich) bis hin zu geringeren Spannungsdifferenzen (gelber Bereich).

Auf dem linken Chip SMCH1 ist das Verhältnis vom Flächenanteil mit geringer bis gar keiner Spannungsdifferenz zu dem Flächenanteil mit großer Spannungsdifferenz gleich groß (1:1).

Beim rechten Spannungsmesschip SMCH9 ist das Verhältnis von hoher Spannungsänderung zu geringer Spannungsdifferenz 2:1. Der obere Chip zeigt kaum Bereiche mit geringer Spannungsdifferenz. Lediglich die untere linke Ecke zeigt Bereiche mit geringer Spannungsdifferenz. Das Verhältnis zwischen hoher Spannungsänderung und kleiner Spannungsänderung ist auf dem unteren Chip (SMCV13) 3:1. Demnach ist es möglich über die Spannungsdifferenzen in X- und Y-Richtung auf dem Chip auf seine Verbiegung zu schließen.

3.4.4. Schlussfolgerungen für die elektrischen Messungen

Zusammenfassend kann aus den zuvor durchgeführten Untersuchungen gesagt werden, dass jeder Chip dreimal gemessen wird, um Schwankungen heraus zu mitteln. Nach den drei Messungen auf einem Chip muss die Kammer des Nadeltesters wieder geöffnet werden, um den nächsten Chip zu kontaktieren. Während dieser Zeit sinkt die Temperatur in der Kammer ein wenig ab, da die Raumtemperatur etwa 2 °C unterhalb der Temperatur in der Kammer liegt. Nach dem Schließen der Kammer sollte ungefähr drei Minuten mit der nächsten Messung gewartet werden, so dass sich die Temperatur in der Kammer wieder stabilisiert. Für die Berechnung des piezo-resistiven Koeffizienten wird eine Temperatur von 25 °C angenommen. Zudem wurde der Einfluss der Nadeln beim Kontaktieren eindeutig gemessen. Aus diesem Grund ist es ratsam, die Nadeln nicht zwischen den drei Messungen auf ein und demselben Chip abzuheben, um den Spannungseinfluss durch das Kontaktieren der Nadeln immer minimal und möglichst gleich zu halten. Zusätzlich wurde folgende Nummerierung, wie in Abbildung 87 dargestellt, für die Transistoren bestimmt und nachgewiesen. Diese wird verwendet um zum

Beispiel die Ergebnisse der piezo-resistiven Messungen mit der Simulation und den Ergebnissen aus den Raman-Spektroskopie-Messungen zu vergleichen.

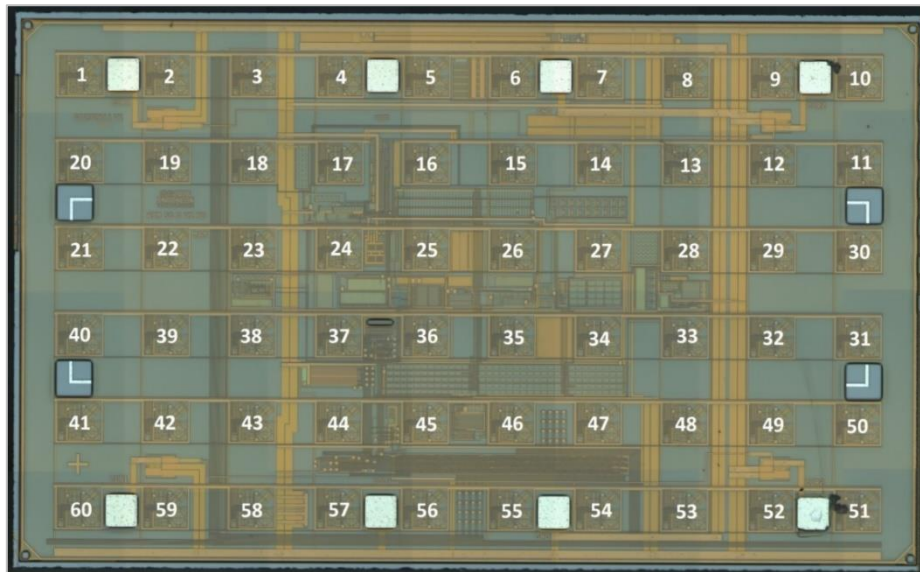


Abbildung 97: Experimentell bestimmte Nummerierung der Transistoren auf dem Spannungsmesschip

Aus dem Biegeversuch ist zu erkennen, dass die über den piezo-resistiven Koeffizienten bestimmte Spannung der eingebrachten mechanischen Spannung entspricht (Abbildungen 85 und 86). Das wird vor allem deutlich, wenn man sich die mechanische Spannung in X- und Y-Richtung der Transistoren 5, 55, 56 in Abbildung 98 ansieht. Hier wird der lineare Zusammenhang zwischen steigendem Unterdruck und der zunehmenden Differenz der mechanischen Spannung ersichtlich. Zudem stimmen die gezeigten Spannungsbilder der fünf auf den Trägerwafer geklebten Spannungsmesschips mit der vom Trägerwafer gezeigten Verbiegung überein.

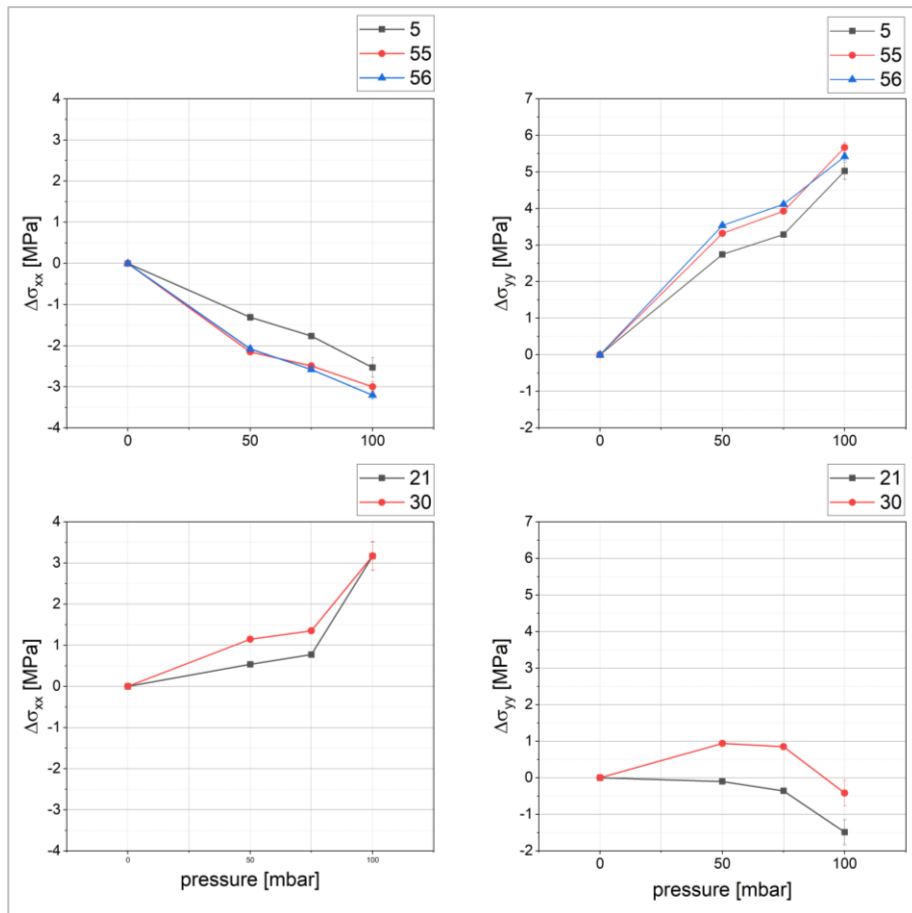


Abbildung 98: Darstellung der Differenz der mechanischen Spannung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Drücke von ausgewählten Transistoren auf dem Spannungsmesschip

3.5. Ergebnisse aus den elektrischen Messungen

3.5.1. Einfluss der Probenpräparation

Zu den durchgeführten Probenpräparationsschritten gehörte unter anderem auch das Plasmaätzverfahren, welches dafür genutzt wurde, die schützende Chippassivierung zu entfernen und das Leadframe zu reinigen. Ein wichtiger Bestandteil dieser Promotion ist der Vergleich der Spannungswerte, die zum einen mit der Raman-Spektroskopie gemessen wurden mit den Spannungswerten, die mit der piezo-resistiven elektrischen Methode gemessen wurden. Dieser Vergleich war nur durch das Entfernen der Passivierung möglich. Die einige Mikrometer dicke Passivierung über den Chips absorbiert einen Großteil des eingestrahlenen Laserlichts, wodurch es nicht möglich war, mit den zuvor gewählten Messparametern aus Kapitel 3.2.4., ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis des Raman-Signals zu erhalten.

Aus diesem Grund wurde die Passivierung auf den Chips mittels Plasmaätzverfahren (MUEGGE R3T) entfernt. Um auszuschließen, dass dieses zusätzliche Verfahren den Spannungszustand im Chip verändert, wurde die Spannung von fünf Chips vor und nach dem Plasmaätzschritt elektrisch bestimmt. Die folgenden Abbildungen 99 und 100 zeigen die Differenzen zwischen den Spannungstensenoren in X- und in Y-Richtung vor und nach dem Plasmaätzschritt.

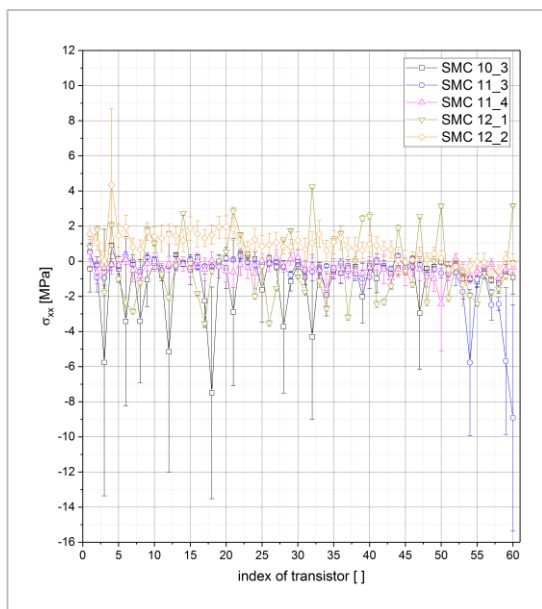


Abbildung 99: Differenz der Spannungstensenoren σ_{xx} vor und nach dem Plasmaätzen

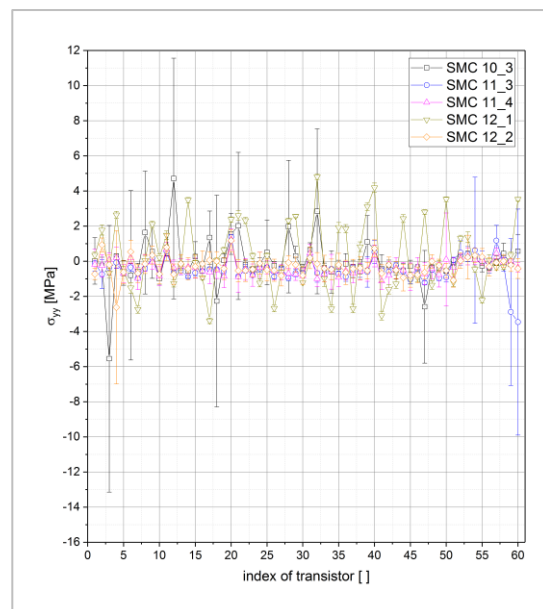


Abbildung 100: Differenz der Spannungstensenoren σ_{yy} vor und nach dem Plasmaätzen

Beide Graphen zeigen eine geringe Differenz der beiden Spannungskomponenten, welche kleiner als die Standardabweichung sind, abgesehen von Chip 10.3 (schwarz) und Chip 12.1 (olivgrün). Diese beiden Chips weisen an den Stellen mit hoher Differenz auch eine höhere Standardabweichung auf. Das bedeutet, dass die gemessenen Werte der einzelnen Messzellen für die Spannungen vor und nach dem Plasmaätzen so stark schwanken, dass auch die Differenz der Spannung kleiner ist als die Schwankungen der einzelnen Messzelle selbst. Aus diesem Grund kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss des Plasmaätzverfahrens auf die Verspannungen im Chip keinen signifikanten Einfluss hat. Die Differenzen der Spannungen schwanken in einem Bereich von ± 1 MPa.

Der nächste Probenpräparationsschritt, welcher zwischen den Prozessschritten notwendig war, ist das Ätzen mittels Argonplasma. Dies war notwendig, da die zum Bonden benötigte Silberbeschichtung, das sogenannte Silber-Plating, auf dem Kupferleadframe angelaufen war. Es hatte sich eine dünne Schicht Silbersulfid auf dem Silber gebildet, welches die Haftung der Ball-Wedges beim Wirebond-Prozess sehr stark reduziert (Abbildungen 101 und 102).

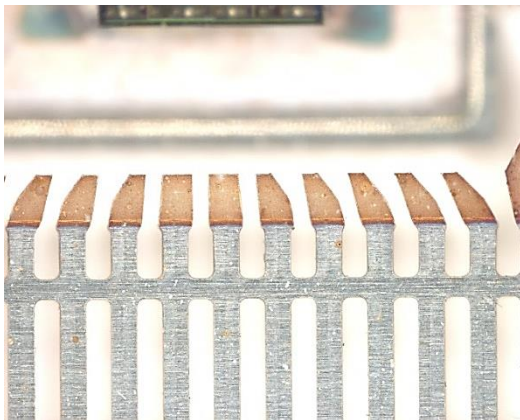


Abbildung 101: Mikroskopbild bei 30-facher Vergrößerung der Silberkontakte auf dem Leadframe vor dem Ar-Plasmareinigen



Abbildung 102: Mikroskopbild bei 32-facher Vergrößerung der Silberkontakte auf dem Leadframe nach dem Ar-Plasmareinigen

Die nachfolgenden Abbildungen 103 und 104 zeigen jeweils die Differenz der Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} vor und nach dem Ar-Plasmaätzen. Beide Graphen zeigen, dass die Differenzen und somit die Einflüsse des Ar-Plasmaätzens auf die Spannungen im Chip sehr gering sind. Der Chip SMC22 weist allerdings bei einigen Messzellen eine deutlich höhere Spannungsdifferenz auf. Bei diesen Messzellen ist jedoch auch die Standardabweichung deutlich höher. Das bedeutet, dass diese Messzellen bereits hohe Schwankungen der gemessenen Spannungen vor der Präparation hatten und somit nicht eindeutig belegbar ist, dass

die erhöhten Differenzen auf den Einfluss des Verfahrens zurückzuführen sind. Es gilt also auch hier, dass der Einfluss des Plasmaätzverfahrens nicht signifikant nachweisbar ist. Zudem ist das Ar-Plasmaverfahren mit den gewählten Parametern Ar-Fluss 50 sccm, Druck 41 mTorr; Leistung 150 W und Zeit 1 min eine geeignete Methode, um die dünne Schicht Silbersulfid auf dem Silber zu entfernen.

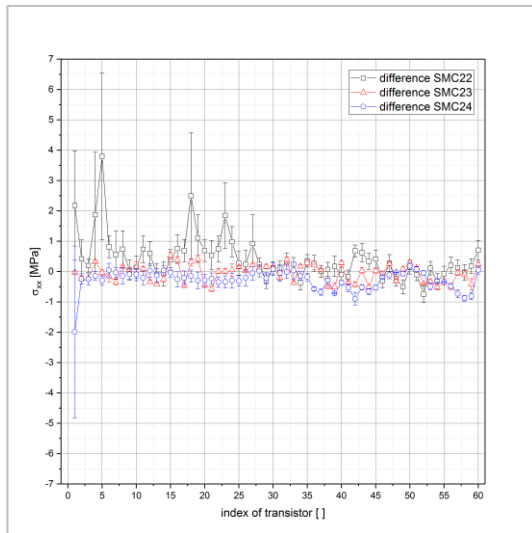


Abbildung 103: Differenzspannung σ_{xx} vor und nach dem Ar-Plasmaätzschritt

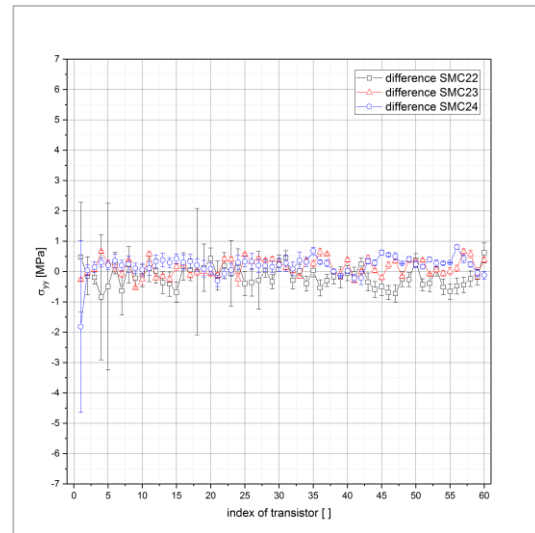


Abbildung 104: Differenzspannung σ_{yy} vor und nach dem Ar-Plasmaätzschritt

3.5.2. Aufbau eines Modellchips

Um zu verstehen welchen Einfluss jeder einzelne Prozessschritt eines elektrischen Bauteils auf die intrinsische Spannung in einem Chip hat, wurden Spannungsmesschips mit den typischen Aufbausritten (Die Attach, Wirebonding, Mold Compound) prozessiert. Aus den einzelnen Prozessschritten wurden jeweils zehn Spannungsmesschips verwendet und mit Hilfe der piezo-resistiven elektrischen Messung die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche bestimmt. In dem ersten vorhergehenden Experiment wurden die Chips nicht prozessbegleitend gemessen, da nach der Auswertung der piezo-resistiven Messung festgestellt wurde, dass die Schwankungen zwischen den Spannungsmesschips innerhalb eines Prozessschritts sehr groß sind. Daher wurde auf Raman-Messungen aller Chips verzichtet. Es wurde lediglich ein Chip pro Prozessschritt mittels Raman-Spektroskopie gemessen, um sicherzustellen, dass der Einfluss der einzelnen Prozesse auf die intrinsische Spannung im Chip auch mit der Raman-Spektroskopie bestimmbar ist. Zusätzlich konnte man mit Hilfe dieser Raman-Messungen erkennen, welche Positionen auf dem Chip wirklich ein Siliziumsignal liefern und welche nicht (Kapitel 3.3, Abbildungen 40 und 41).

Im nachfolgenden Experiment wurden die Chips prozessbegleitend gemessen. Dieses Mal wurde bei 10 von den 30 Chips das Imid mittels Plasmaätzverfahren entfernt, um die mechanische Spannung im Chip zusätzlich mit der Raman-Spektroskopie zu bestimmen. Der Einfluss des Plasmaätzverfahrens wurde bereits im vorherigen Kapitel 3.5.1. beschrieben und untersucht.

1. Experiment: Piezo-resistive elektrische Messungen (nicht prozessbegleitend)

Das Diagramm in der folgenden Abbildung 105 zeigt die über den gesamten Spannungsmesschip gemittelte mechanische Spannung in Abhängigkeit der Prozessschritte. Die Mittelwerte der einzelnen Chips innerhalb eines Prozessschritts schwanken nur sehr gering. Einzige Ausnahme ist ein Chip beim Prozessschritt Die Attach. Aus diesem Grund kann gesagt werden, dass die gemessenen Änderungen signifikant sind, obwohl bei diesem Experiment unterschiedliche Chips aus unterschiedlichen Prozessschritten miteinander verglichen wurden.

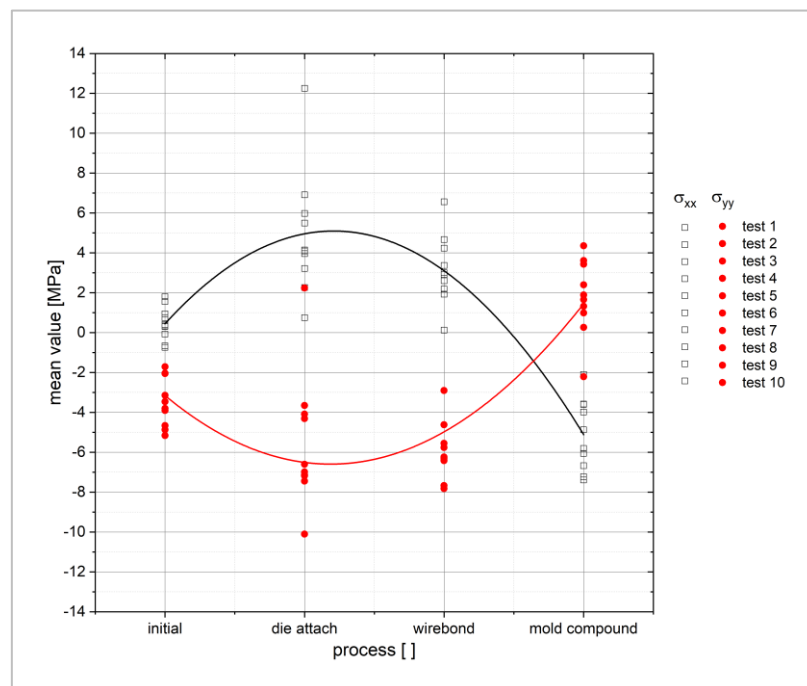


Abbildung 105: Mechanische Spannung gemittelt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte

Die Änderung der mittleren mechanischen Spannung nach dem Die Attach ist mit 5 MPa in X-Richtung beziehungsweise -5 MPa in Y-Richtung relativ gering. Aufgrund der Vorzeichen der Spannungen der jeweiligen Koordinatensystemrichtung kann geschlussfolgert werden, dass nach dem Die Attach-Prozess die Spannungsmesschips in X-Richtung auf Zug beansprucht (positives Vorzeichen) und in Y-Richtung auf Druck beansprucht (negatives Vorzeichen) werden. Die messbare Änderung der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche hervorgerufen durch den Wirebond-Prozess ist nur minimal, da während dieses Prozesses die Spannungen nur lokal im Bereich der jeweiligen Bond-Pads in den Chip eingebracht werden. Nach dem Wirebond-Prozess wird die mechanische Spannung in X-Richtung minimal kleiner und in Y-Richtung minimal größer. Das bedeutet, dass der Spannungsmesschip in X-Richtung nach wie vor auf Zug und in Y-Richtung auf Druck beansprucht ist. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der Raman-Spektroskopie ist mittels piezo-resistiver Messung die starke Spannungsänderung nach dem Wirebond-Prozess nicht nachweisbar, obwohl, wie in Kapitel 3.3.2. beschrieben, die Glasübergangstemperatur des Die Attach erreicht wird und die Steifigkeit auf 5 % sinkt. Den größten Einfluss auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche hat das Vergießen des Mold Compounds. Der Grund dafür ist, dass das Mold Compound im Vergleich zum Chip ein sehr großes Volumen hat, welches sich komplett um den Chip herum befindet und sich beim Abkühlen auf Raumtemperatur zusammenzieht. Aufgrund dessen weisen die Spannungen in X- und in Y-Richtung nach dem Mold-Prozess die größten Änderungen auf.

Die mechanische Spannung ist nach dem Mold-Prozess in X-Richtung negativ beziehungsweise in Y-Richtung positiv. Dadurch ändert sich die Spannung an der Oberfläche des Spannungsmesschips in X-Richtung von Zugspannung auf Druckspannung und in Y-Richtung von Druckspannung auf Zugspannung. Darüber hinaus ist auffällig, dass die Spannungstensoren σ_{xx} und σ_{yy} gegensätzlich verlaufen. So ist beispielsweise das Vorzeichen der Spannungsänderung vom Initial-Zustand zum Prozessschritt Die Attach für die Spannung in X-Richtung positiv (Zugspannung) und für die Spannung in Y-Richtung negativ (Druckspannung). Auch beim Mold-Prozess haben die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} entgegengesetzte Richtungen, da der Spannungsmesschip in X-Richtung auf Druck und in Y-Richtung auf Zug beansprucht ist. Dies kann vor allem über den piezo-resistiven Effekt erklärt werden. Wenn an zwei gegenüberliegenden Seiten des Kristalls nach außen gezogen wird (Zugspannung), werden die anderen beiden Seiten nach innen gedrückt. In der klassischen Mechanik wird diese Einschnürung aber nicht als mechanische Spannung bezeichnet.

Ob dieser deutlich erkennbare Einfluss der unterschiedlichen Prozessschritte aus Abbildung 105 auf die intrinsische Spannung auch messbar ist, wenn die einzelnen Aufbauschritte auf ein und demselben Chip gemessen werden, soll das folgende Experiment zeigen.

2. Experiment: Piezo-resistive elektrische Messungen (prozessbegleitend)

Beim prozessbegleitenden Messen wurden die mechanischen Spannungen der einzelnen Spannungsmesschips nach jedem Aufbauschritt mit Hilfe der piezo-resistiven elektrischen Messung bestimmt. Zusätzlich zu den Raman-Messungen auf den ersten zehn Chips wurde die Verbiegung der Chipoberfläche mittels Weißlichtinterferometer gemessen. Die Ergebnisse aus den Weißlichtinterferometer-Messungen werden in dem gesonderten Kapitel 3.6. „Ergebnisse zusätzlicher Analysen“ ausführlich behandelt.

Während des Wirebond-Prozesses wurde das Leadframe stark beschädigt und konnte im Folgenden nicht mehr weiter aufgebaut werden, da durch eine Förderwalze das Ende des Leadframe komplett verbogen wurde.

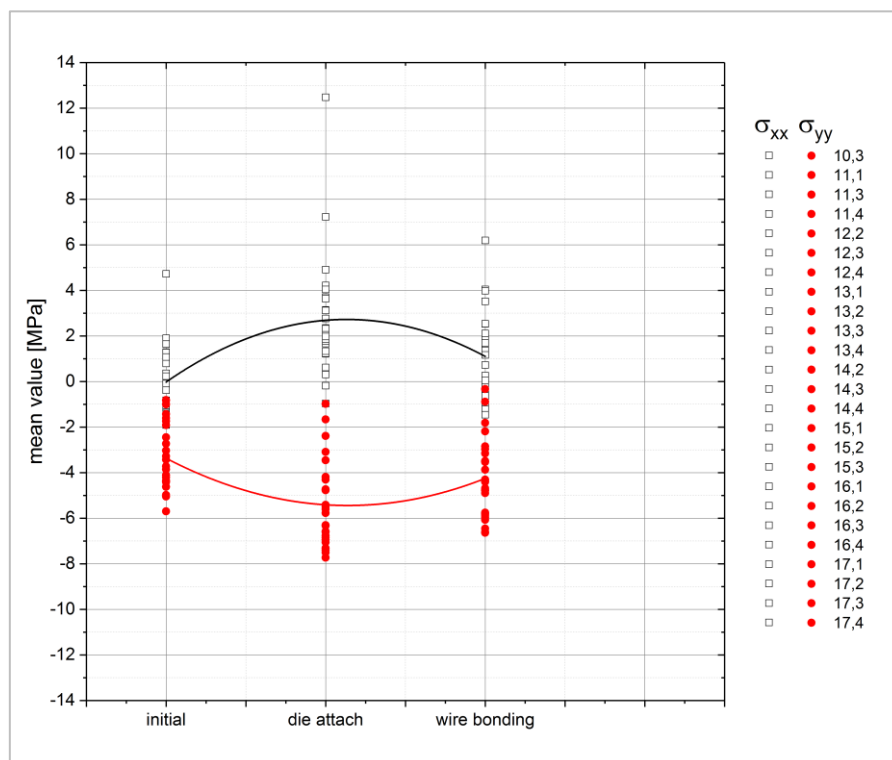


Abbildung 106: Mittelwerte der Spannungsänderung zum jeweils vorherigen Prozessschritt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte

Dadurch war es nicht mehr möglich, den zum Molden benötigten Druck aufzubauen, da die obere und untere Pressplatte nicht mehr komplett schließen. Ein kompletter Neuaufbau hätte circa ein Jahr in Anspruch genommen. Dies würde jedoch den Zeitplan dieser Arbeit überschreiten. Alle Überlegungen dieses Experiment doch noch weiterführen zu können waren nicht durchführbar oder so experimentell, dass der ursprüngliche Gedanke, die Experimente immer möglichst nah an der Realität durchzuführen, nicht mehr gegeben war. Da ein Neustart der Versuchsreihe aufgrund des dafür benötigten Zeitraums nicht mehr durchführbar war, fehlen in Abbildung 106 die Punkte zum Prozessschritt Molden.

Vergleicht man die Linienverläufe von Abbildung 105 mit Abbildung 106, so ist zu erkennen, dass die Verläufe sehr ähnlich sind. Lediglich bei der Kurve der nicht-begleitenden Messreihen fällt im Vergleich zur begleitenden Messreihe auf, dass bei ersteren der Bogen der Kurve für die Spannungskomponente in X-Richtung weiter ausgebildet ist. Der Grund dafür ist, dass die Werte der mechanischen Spannung sowohl in X- als auch in Y-Richtung beim nicht-prozessbegleitenden Messen im Vergleich zum prozessbegleitenden Messen fast doppelt so hoch sind. Deutlich wird dies auch beim Betrachten der Schnittpunkte der Kurve mit den jeweiligen Datenmengen aus Tabelle 12. Hierbei ist der Unterschied der Spannungskomponente in X-Richtung beim Die Attach $\sigma_{xx} = 2,21$ MPa und $\sigma_{yy} = 0,11$ MPa am größten

Tabelle 12: Vergleich der Schnittpunkte der eingezeichneten Kurve (Tendenz) mit den jeweiligen Datenmengen aus den unterschiedlichen Aufbausritten für die prozessbegleitende und nicht-prozessbegleitende Messreihe

Processing Step []	Not process supported		Process supported	
	σ_{xx} [MPa]	σ_{yy} [MPa]	σ_{xx} [MPa]	σ_{yy} [MPa]
Initial	0,46	-3,58	-0,02	-3,37
Die Attach	4,90	-5,52	2,69	-5,41
Wirebonding	3,16	-5,95	1,10	-4,25
Molding	-5,13	1,77	-	-

Aufgrund der Ähnlichkeit der Kurven aus der prozessbegleitenden Messreihe (Abbildung 106) und der nicht-prozessbegleitenden Messreihe (Abbildung 105), kann zusammenfassend gesagt werden, dass es durchaus möglich ist, eine Aussage über die gemittelten mechanischen Spannungen über den gesamten Chip zu treffen. Dafür ist es nicht notwendig einen Chip

prozessbegleitend zu messen. Allerdings sind hierbei positionsgetreue Aussagen über den jeweiligen Einfluss nicht möglich, da in Kapitel 3.4.2. gezeigt wurde, dass die Varianz über die unterschiedlichen Chips zu groß ist. Darüber hinaus ist es bei diesem Experiment, bei welchem die Spannungsmesschips prozessbegleitend gemessen wurden, auch möglich, den Einfluss der einzelnen Prozessschritte Die Attach und Wirebonding eindeutig zu bestimmen.

Die folgenden Abbildungen 107 und 108 zeigen jeweils die Differenz der über den gesamten Chip gemittelten Spannungskomponente zum vorherigen Prozessschritt und damit den Einfluss des betrachteten Prozesses auf die mechanische Spannung im Chip.

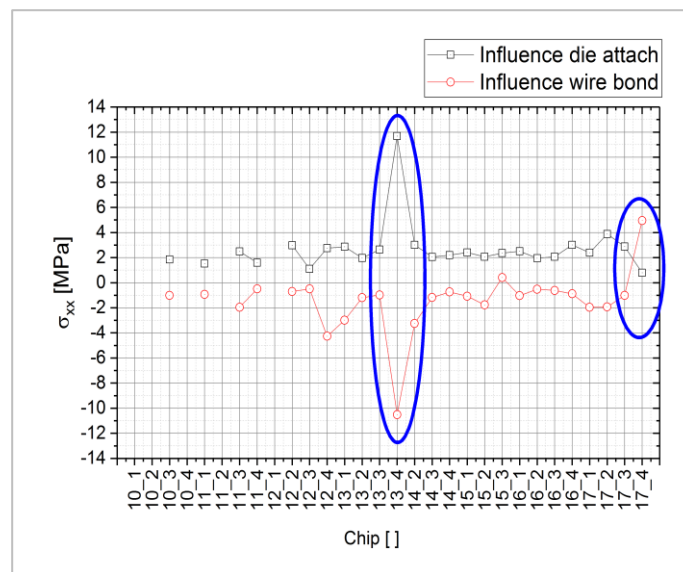


Abbildung 107: Änderung der Spannungskomponente σ_{xx} nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess

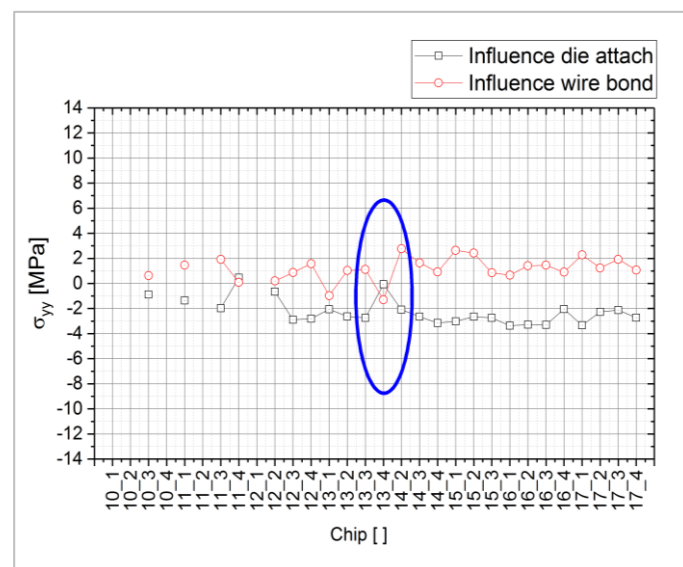


Abbildung 108: Änderung der Spannungskomponente σ_{yy} nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess

Betrachtet man zunächst die Spannungskomponente σ_{xx} (Abbildung 107) so ist zu erkennen, dass der Spannungseintrag durch den Die Attach bei allen gemessenen Chips um 2,37 MPa mit einer Standardabweichung von 0,6 MPa schwankt, ohne die blau markierten Ausreißer. Beim Wirebonding sind die Schwankungen etwas größer. Hier liegt der Mittelwert bei -1,33 MPa mit einer Standardabweichung von 1,04 MPa (ohne die blau markierten Ausreißer). Die mittlere mechanische Spannung sinkt nach dem Die Attach-Prozess in Y-Richtung um $2,37 \text{ MPa} \pm 0,94 \text{ MPa}$. Nach dem Wirebond-Prozess nimmt die mittlere mechanische Spannung in Y-Richtung um den Wert $1,26 \text{ MPa} \pm 0,85 \text{ MPa}$ zu. Somit sind die Spannungsänderungen nach dem jeweiligen Prozess in X- und Y-Richtung gleich groß, nur mit entgegengesetztem Vorzeichen. Der Grund dafür ist, wie bereits zuvor erwähnt, der piezo-resistive Effekt. Vergleicht man die mittlere Änderung der Spannung in X-Richtung nach dem Die Attach mit der mittleren Änderung nach dem Wirebond-Prozess, erkennt man, dass die Änderung nach dem Wirebond-Prozess kleiner ist. Die blau markierten Werte des Chips 13_4 und 17_4 für σ_{xx} und 13_4 für σ_{yy} wurden von der Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass bei der Messung dieser beiden Spannungsmesschips nach dem Die Attach ein Fehler aufgetreten ist. Begründet wird diese Annahme dadurch, dass der gemessene Spannungsmittelwert sehr weit von den Mittelwerten der anderen Chips abweicht. Es fällt auf, dass die Differenz nach dem Wirebond-Prozess ungefähr genauso so groß ist, wie nach dem Die Attach, nur mit entgegengesetztem Vorzeichen. Vergleicht man die Mittelwerte der Spannungsmesschips 13_4 und 17_4 mit dem der anderen Chips nach dem Wirebond-Prozess, so fällt auf, dass die Abweichung der Mittelwerte dieser beiden Chips innerhalb der Standardabweichung aller anderen Chips liegt. Die Abweichung für den Wirebond-Prozess in Abbildung 107 und 108 kommt daher nur durch die hohe Abweichung des Spannungsmittelwertes nach dem Die Attach zustande. Die große Varianz der drei Messungen durch das Abweichen einer der drei Messungen auf dem Chip 13_4 und 17_4 bestätigt diese Vermutung. Da alle gemessenen Chips annähernd den gleichen Spannungsunterschied nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess zeigen, kann die Spannungsverteilung der beiden Chips stellvertretend für alle anderen Chips betrachtet werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} jeweils vom Chip 12_2 (Abbildungen 109 und 110) und Chip 16_2 (Abbildungen 111 und 112).

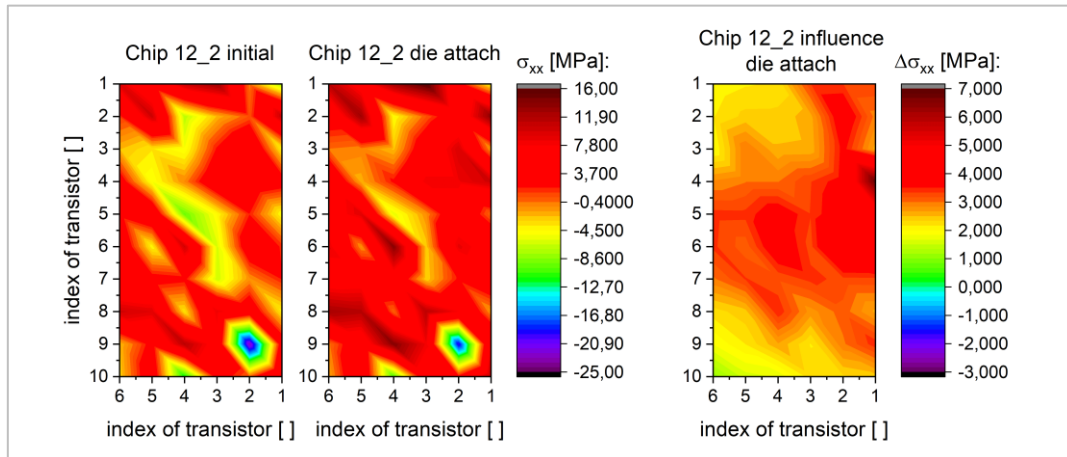


Abbildung 109: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 12_2

In Abbildung 109 ist zu sehen, dass die mechanische Spannung auf dem Spannungsmesschip durch den Die Attach-Prozess ansteigt. Damit ist der Chip stärker auf Zug beansprucht. Das wird zum Beispiel dadurch deutlich, dass der grüne bis gelbe Bereich (-9 MPa bis -4 MPa) nach dem Die Attach viel kleiner geworden ist. Außerdem tauchen in den Bereichen, welche auf dem Chip im Grundzustand noch rot (5 MPa) gefärbt sind, vermehrt dunkelrote (10 MPa) Areale auf.

Der markante grüne (-9 MPa) bis blaue (-20 MPa) Fleck in der unteren rechten Ecke wird zudem deutlich kleiner, da auch hier die mechanische Spannung durch den Die Attach-Prozess größer wird.

Die Änderung (Differenz) der mechanischen Spannung nach dem Die Attach ist im rechten Bild der Abbildung 109 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass sich die Spannung in der oberen und unteren linken Ecke nur sehr wenig ändert. Die Spannungsänderung in diesen beiden Bereichen liegt zwischen 0 MPa und 2 MPa. Die rechte Seite und die Mitte des Spannungsmesschips zeigen hingegen die größte Änderung. Hier liegen die Differenzen zwischen 5 MPa (rot) und 7 MPa (dunkelrot). Der asymmetrische Verlauf deutet darauf hin, dass der Kleber nicht gleichmäßig zwischen Chip und Leadframe aufgebracht wurde und sich dadurch nach dem Abkühlen nicht gleichmäßig zusammengezogen hat.

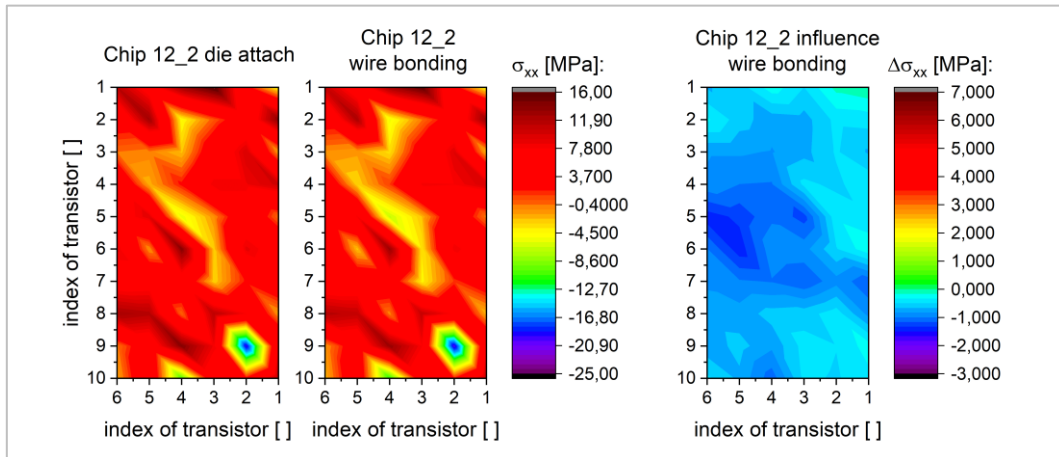


Abbildung 110: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 12_2

Der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung ist in Abbildung 110 dargestellt. Hieraus geht hervor, dass die Spannung nach dem Wirebond-Prozess kleiner geworden ist. Der Chip ist demnach geringer zugverspannt. Das bestätigt auch den Verlauf des Graphen aus Abbildung 107. Der Grund für die wiederholte globale Spannungsänderung auf dem gesamten Chip ist das erneute Erreichen der Glasübergangstemperatur T_G des Klebers und das damit verbundene Herabsinken der Steifigkeit auf 5 % (Kapitel 3.3.2.).

Das kleiner werden der Spannung wird deutlich, wenn man die beiden linken Bilder in Abbildung 110 miteinander vergleicht. Der gelbe Bereich (-4 MPa), welcher sich in der Mitte des Spannungsmesschips befindet, wird nach dem Wirebond-Prozess etwas größer und die dunkelroten (10 MPa) Areale in der Mitte des Chips kleiner.

Zusätzlich wird der gelbe (-4 MPa) bis blaue (-20 MPa) Fleck, welcher nach dem Die Attach größer geworden ist, nun wieder kleiner.

Die Änderung der mechanischen Spannung durch den Wirebond-Prozess ist im rechten Bild der Abbildung 110 dargestellt. Dieses Bild zeigt, dass der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung, im Gegensatz zum Einfluss des Die Attach (Abbildung 109), deutlich kleiner ist. Nach dem Die Attach war der Spannungsmesschip in der Mitte und am rechten Rand stärker zugverspannt. Die Differenz lag bei 5 MPa bis 7 MPa. Nach dem Wirebond-Prozess verändert sich die mechanische Spannung in der Mitte und am linken Rand am stärksten. Hier wird die Zugspannung mit einer Differenz von bis zu -1,5 MPa (dunkelblau) wieder kleiner. Der rechte Rand bleibt mit einer Differenz von -0,02 MPa bis -0,5 MPa fast unverändert.

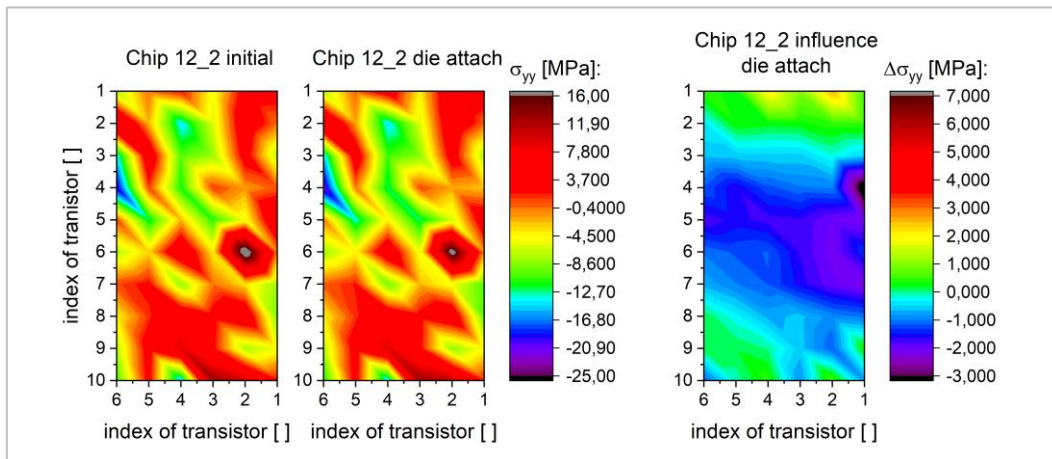


Abbildung 111: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 12_2

Die Abbildung 111 zeigt den Einfluss des Die Attach-Prozesses auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche in Y-Richtung. Vergleicht man die beiden linken Bilder miteinander, so erkennt man, dass sie sich sehr ähneln und sich demzufolge die Spannung in Y-Richtung nach dem Die Attach nur geringfügig ändert. Die einzige Stelle, bei der eine Änderung der Spannung sichtbar wird, ist der rote Rand (-3 MPa bis -5 MPa) um den grauen Punkt (20 MPa). Diese wirken nach dem Die Attach etwas kleiner, da die Spannungswerte um den grauen Punkt herum kleiner geworden sind. Besonders deutlich wird das im rechten Bild. Im Bereich des grauen Punkts bei X=2 und Y=6 und in der Mitte des Chips sind die Änderungen der Spannung mit -2 MPa (violett) am größten. Der obere und untere Rand zeigen mit 0,5 MPa nur sehr geringe Spannungsänderungen. Vergleicht man die Abbildung 111 mit der Abbildung 109, dann wird deutlich, dass die Bereiche mit Zugspannung in Y-Richtung sehr viel kleiner sind als in X-Richtung, in welcher nahezu der ganze Chip auf Zug beansprucht ist. In Y-Richtung gibt es zusätzlich zu den Bereichen mit Zugspannung, welche vermehrt im unteren Teil des Chips auftreten, auch Bereiche mit Druckspannung, die vermehrt im oberen Teil des Chips auftreten.

Der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung im Chip in Y-Richtung ist in der nachfolgenden Abbildung 112 zu sehen. Vergleicht man die beiden linken Diagramme miteinander, so fällt auf, dass der Unterschied zwischen den beiden kaum zu erkennen ist. Erst wenn die Differenz der mechanischen Spannung im rechten Diagramm betrachtet wird, erkennt man leichte Differenzen. Ein Großteil des rechten Diagramms zeigt Werte im Bereich zwischen -0,5 MPa (hellblau) und 0,5 MPa (grün). Lediglich in der Nähe des rechten Randes ist die Differenz mit 1 MPa (gelb) leicht erhöht. Im Vergleich zum Die Attach (Abbildung 111) ist der Einfluss des Wirebond-Prozesses (Abbildung 112) sehr gering.

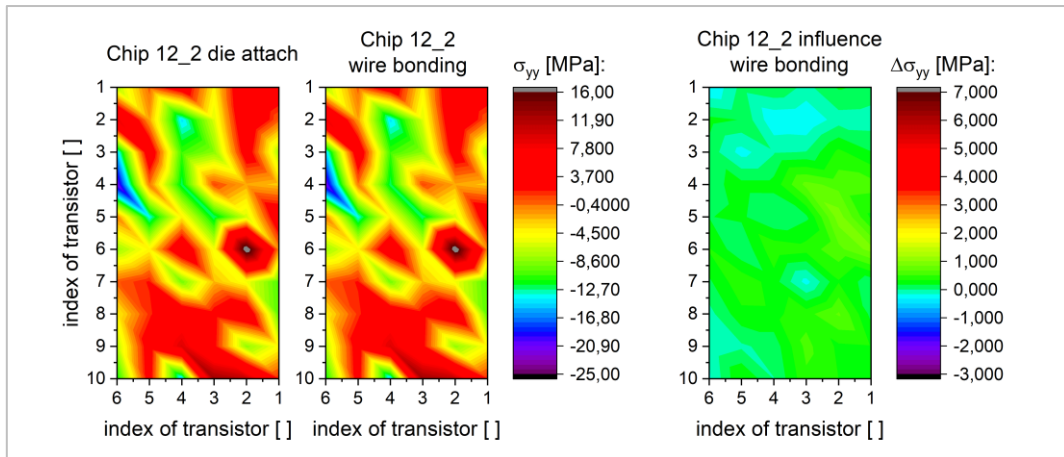


Abbildung 112: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 12_2

Die Ergebnisse der piezo-resistiven Messungen auf dem Chip 16_2 sind in den folgenden Abbildungen 113 bis 126 zu sehen. Die Abbildung 113 zeigt den Einfluss des Die Attach auf die mechanische Spannung in X-Richtung. Vergleicht man die mechanische Spannung auf dem Chip vor dem Prozessieren und nach dem Die Attach miteinander (Bilder links), dann erkennt man, dass die mechanische Spannung in der Mitte des Chips (roter Bereich) angestiegen ist.

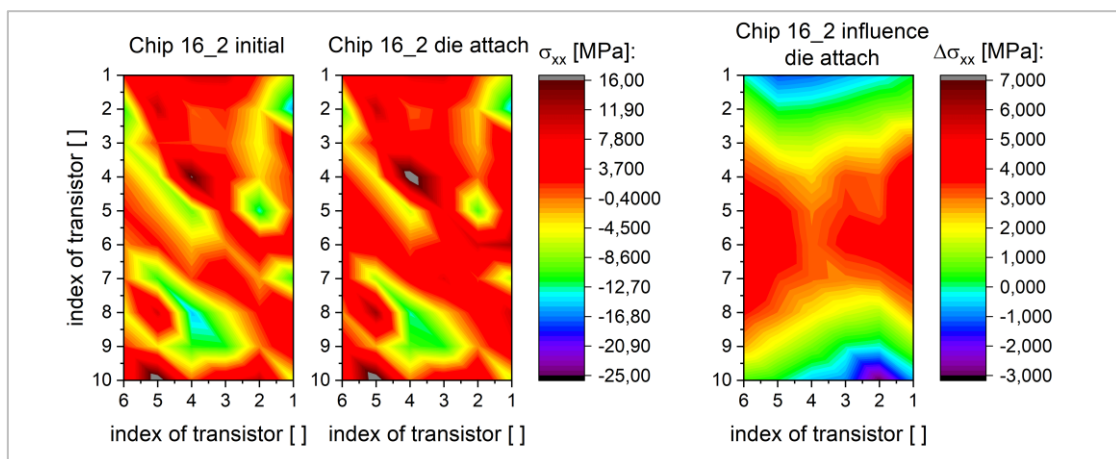


Abbildung 113: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 16_2

Anhand des gestiegenen Flächenanteils der roten Färbung im Zentrum des Chips, kann geschlussfolgert werden, dass der Anteil positiver mechanischer Spannung größer geworden ist. Das bedeutet, dass der Chip im Zentrum nach dem Die Attach stärker zugverspannt ist. Dies wird auch bei der Betrachtung des rechten Bildes von Abbildung 113 in der Mitte des Spannungsmesschips deutlich. Der farbliche Verlauf zeigt, dass die Spannungsänderung in der Mitte am größten ist und in Richtung oberer und unterer Rand kleiner wird. Die Spannungszunahme im Zentrum der Chips beträgt zwischen 3 MPa und 5 MPa. Zusätzlich ist in dem rechten Bild zu erkennen, dass die mechanische Spannung am oberen Rand um bis zu 1 MPa (hellblau) und am unteren Rand sogar um bis zu 2,5 MPa (violett) abnimmt. Der farbliche Verlauf zeigt, dass die Spannungsänderung in der Mitte am größten ist und in Richtung oberer und unterer Rand kleiner wird. Die Spannungszunahme im Zentrum der Chips beträgt zwischen 3 MPa und 5 MPa. Zusätzlich ist in dem rechten Bild zu erkennen, dass die mechanische Spannung am oberen Rand um bis zu 1 MPa (hellblau) und am unteren Rand sogar um bis zu 2,5 MPa (violett) abnimmt. Das bedeutet, dass der Kleber den Spannungszustand in der Mitte des Chips am größten beeinflusst. Vermutlich zieht sich der Kleber hier am stärksten zusammen. Bis auf den oberen und unteren Rand ist die mechanische Spannung auf dem Chip gestiegen. Der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche ist in Abbildung 114 zu sehen. Vergleicht man die mechanische Spannung auf dem Chip nach dem Die Attach mit der mechanischen Spannung nach dem Wirebond-Prozess, so erkennt man, dass sich diese nur geringfügig ändert.

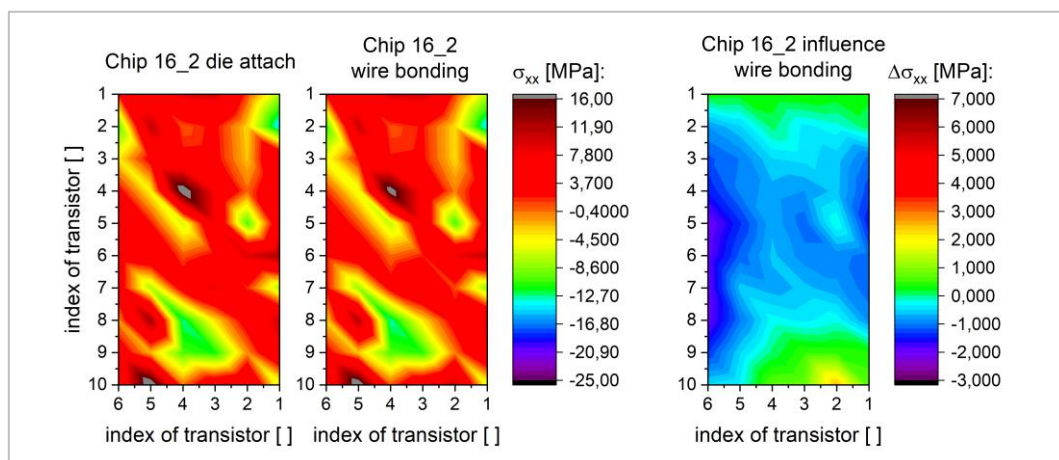


Abbildung 114: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 16_2

Lediglich in der Mitte und am linken beziehungsweise rechten Rand wird die mechanische Spannung kleiner. Der Großteil der Chipoberfläche zeigt auch nach dem Wirebonding Zugspannungen im Bereich von 5 MPa bis 10 MPa (rot). Lediglich im unteren Bereich des Chips und in der oberen linken beziehungsweise rechten Ecke gibt es vereinzelt Bereiche die Druckspannungen mit -7 MPa bis -12 MPa (grün) aufweisen. Der Einfluss des Wirebond-Prozesses wird im rechten Bild der Abbildung 114 deutlicher. Am rechten Rand ändert sich die mechanische Spannung mit -3 MPa am stärksten. In der Mitte und am rechten Rand liegen die Differenzen zwischen -0,5 MPa und -1,5 MPa. Der obere und untere Rand des Spannungsmesschips zeigt mit 0,3 MPa (grün) den geringsten Einfluss des Wirebond-Prozesses. Im Vergleich zum Die Attach (Abbildung 113) ist der Einfluss des Wirebondings (Abbildung 114) auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche gering.

Nach dem Die Attach lagen die Änderungen der mechanischen Spannung zwischen -2 MPa (violett) und 2,5 MPa (orange). Im Vergleich dazu liegt der Einfluss des Wirebond-Prozesses im Bereich von -3 MPa bis 0,3 MPa.

Welchen Einfluss der Prozessschritt Die Attach auf die mechanische Spannung in Y-Richtung hat, zeigt die Abbildung 115. Beim Vergleich der beiden linken Bilder fällt auf, dass sich die mechanische Spannung hauptsächlich in der Mitte des Spannungsmesschips ändert. Die roten Bereiche (5 MPa) werden nach dem Die Attach flächenmäßig kleiner und dafür der Anteil der grünen Bereiche (-11 MPa) größer.

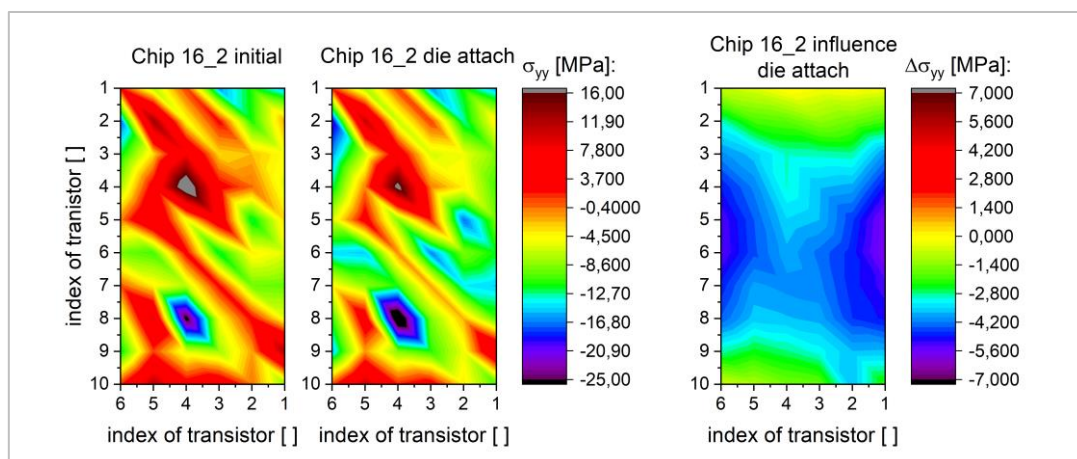


Abbildung 115: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 16_2

Das bedeutet, dass der Spannungsmesschip in Y-Richtung nach dem Die Attach deutlich mehr Druckspannung besitzt. Der rot umrandete graue Punkt wird nach dem Die Attach kleiner, allerdings der violett umrandete schwarze Punkt größer. Auch dieser Fakt spricht dafür, dass der Chip nach dem Die Attach in Y-Richtung deutlich stärker druckverspannt ist. Die Änderungen in der Mitte des Chips liegen zwischen -3 MPa und -5 MPa (rechtes Bild in Abbildung 115). Zusätzlich ist im rechten Bild zu sehen, dass die Änderungen der mechanischen Spannung am rechten und linken Rand mit -6 MPa (violett) am größten sind. Das bedeutet, dass der Einfluss des Die Attach auf die Spannung im Chip am rechten und linken Rand des Chips am größten ist. Da die mechanische Spannung nach dem Die Attach in Y-Richtung beim Chip 16_2 so stark reduziert wird, musste die Skala der Legende im rechten Bild der Abbildung 115 von 7 MPa bis -3 MPa auf 7 MPa bis -7 MPa erweitert werden.

Ebenso wie bei allen anderen Auswertungen des Einflusses des Wirebond-Prozesses, gemessen mit der piezo-resistiven Methode, zeigt auch die Abbildung 116 eine im Vergleich zum Die Attach geringe Änderung der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche. Der Einfluss ist beim Vergleich der linken Bilder kaum ersichtlich. Erst beim Betrachten des rechten Bildes, erkennt man, dass sich die Spannungen bei einem Großteil des Spannungsmesschips lediglich mit 0,5 MPa bis 1 MPa (grün) ändert. Am rechten und linken unteren Rand sind die Änderungen am größten (orange). Dort ändert sich die mechanische Spannung um 2 MPa bis 2,5 MPa.

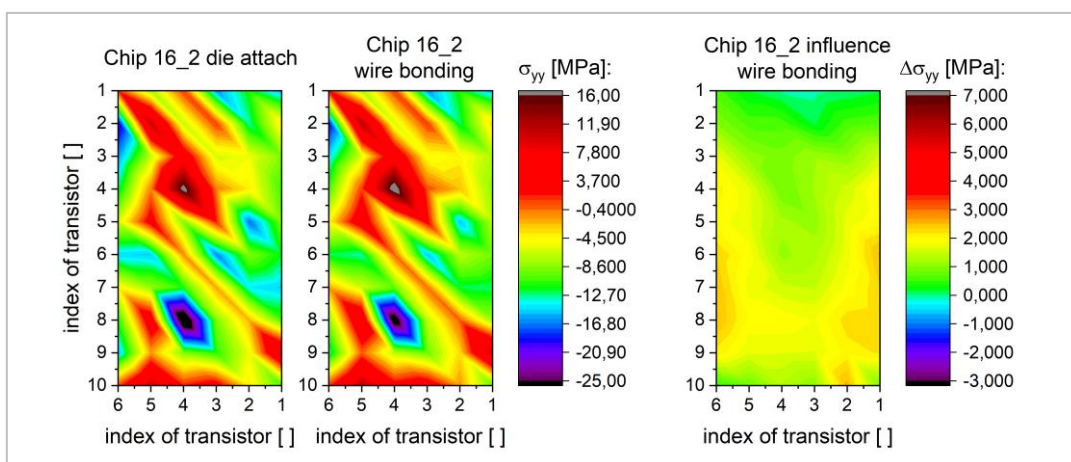


Abbildung 116: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 16_2

Nachdem im Kapitel 3.4.1. der Einfluss der Aufdruckkraft auf die sich daneben befindlichen Transistoren bestätigt wurde, soll auch hier geprüft werden, ob der Wirebond-Prozess Einfluss auf die umliegenden Transistoren hat. Die folgenden zwei Abbildungen 117 und 118 zeigen den Einfluss des Wirebond-Prozesses auf den Chip 12_2 und Chip 16_2. Diese beiden Spannungsmesschips stehen stellvertretend für alle anderen gemessenen Chips.

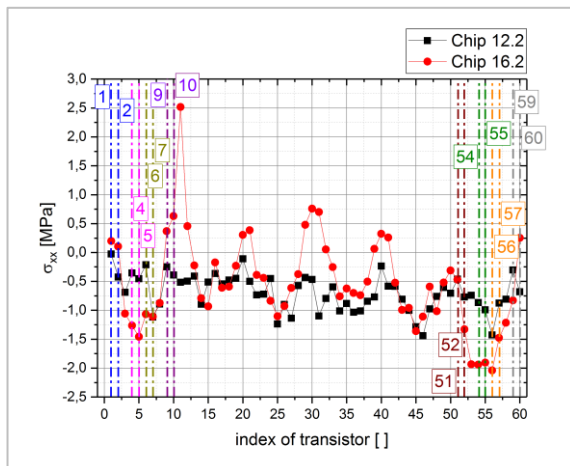


Abbildung 117: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die Spannungskomponente σ_{xx} bei den einzelnen Transistorspiegeln auf dem jeweiligen Chip

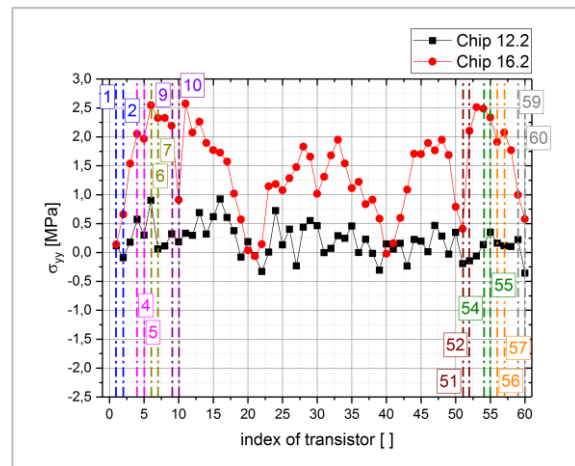


Abbildung 118: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die Spannungskomponente σ_{yy} bei den einzelnen Transistorspiegeln auf dem jeweiligen Chip

In den Abbildungen 117 und 118 sind die Transistorspiegel, welche neben den jeweiligen Bond-Pads liegen, mit einer farbigen gestrichelten Linie markiert und mit den Indizes des jeweiligen Transistorspiegels beschriftet. An diesen Stellen sollte sich die Spannung eindeutig von der restlichen Spannung auf dem Chip abheben und eine deutliche Änderung zeigen.

Jedoch zeigen weder die Kurven von Chip 12_2 und Chip 16_2 bei der Spannungskomponente in X- noch bei der in Y-Richtung eine Auffälligkeit. Die Graphen von Chip 16_2 haben einen wellenförmigen Verlauf über den gesamten Chip. Beim Chip 12_2 ist dieser wellenförmige Verlauf allerdings nicht zu erkennen. Der Grund dafür wird in den Abbildungen 113 bis 116 ersichtlich, da dieser wellenförmige Verlauf widerspiegelt, dass der Chip 16_2 nahezu symmetrisch verspannt ist. Das heißt, dass die Spannungsänderung zur Mitte des Chips hin geringer wird.

Aus den beiden Abbildungen 117 und 118 geht außerdem hervor, dass die Spannungsplateaus, welche sich an den Seiten des Spannungsmesschips (Transistoren 10, 20, 30, 40, 50) in den

Bereichen befinden, in welchen die Bond-Pads sind, um 0,5 MPa erhöht sind. Dieser Effekt muss aber nicht zwingend mit den Bumps des Wirebond-Prozesses in Verbindung stehen, sondern kann auch ein Effekt der globalen mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche des gesamten Chips sein. Aus den Abbildungen 109 bis 116 wurde bereits geschlossen, dass sich die mechanische Spannung an den Rändern anders verhält als in der Mitte des Chips. Ansonsten überwiegt die global herrschende Spannung durch den Die Attach auf dem Chip. Bei Chip 12_2 geht der Einfluss des Wirebond-Prozesses leider gänzlich verloren, höchstwahrscheinlich auch, weil die Spannungen auf dem Chip keinen regelmäßigen Verlauf zeigen.

3.5.3. Partielle Dekapsulierung

Wie eingangs bereits beschrieben, sollte das partielle Dekapsulieren dazu genutzt werden, den für die Raman-Messungen benötigten optischen Zugang zur Chipoberfläche zu erzeugen und dabei möglichst nicht den Spannungszustand des Chips zu verändern. Die piezo-resistive elektrische Messmethode diente bei den Versuchen als Vergleichsmessmethode und als einzig mögliche Methode die Spannungsänderung zu bestimmen, da mit dieser Methode die Spannungen vor und nach dem jeweiligen Prozess bestimmt werden konnten.

Mechanischer Schleifprozess

Die piezo-resistive Messmethode wurde beim Schleifprozess dazu verwendet, den Einfluss des Freilegens einer Chipseite für die Raman-Spektroskopie zu untersuchen. Die Vorgehensweise bei diesem Experiment wurde bereits näher in Kapitel 3.3.3. erläutert. Für das elektrische Auslesen wurde der Spannungsmesschip so eingebettet, dass er auch nach dem Schleifprozess noch elektrisch ausgelesen werden konnte. Dafür wurde beim Einbetten darauf geachtet, dass die Leads des Chips an der für den mechanischen Schleifprozess ausgewählten gegenüberliegenden Seite nur mit wenig Epoxidharz bedeckt sind. Dieses Epoxidharz wurde nach dem Entfernen des Mold Compounds für die Raman-Messungen mit einem zusätzlichen Schleifprozess entfernt.

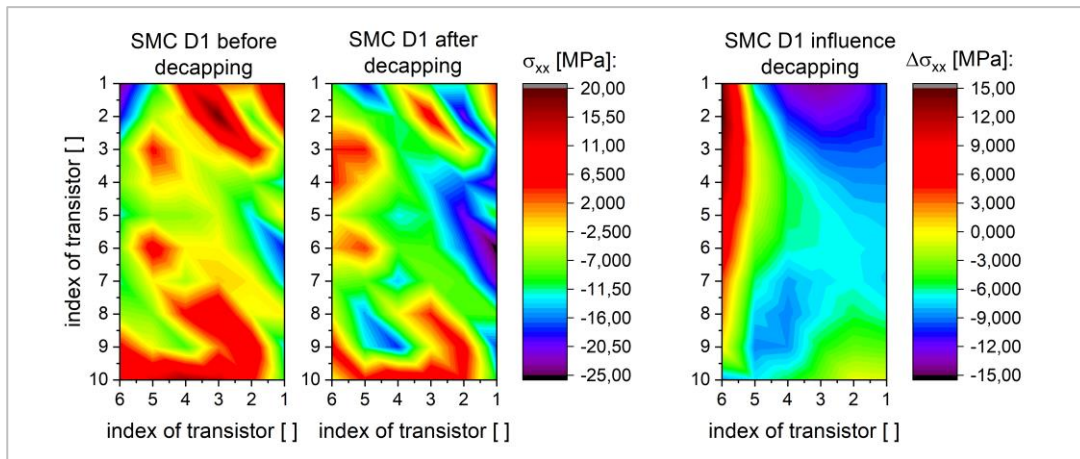


Abbildung 119: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D1 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen

In Abbildung 119 sieht man den Einfluss des mechanischen Schleifprozesses, durch den es möglich war, den Einfluss des Moldings über die gesamte Chipdicke mit dem Raman-Spektrometer zu messen (Kapitel 3.3.3.). Dabei wurde das Mold Compound an der linken Seite des Chips entfernt. Vor dem Dekapsulieren zeigt die Oberfläche des Spannungsmesschips D1 an der oberen und unteren Seite überwiegend Zugspannungen. Die Werte für die Zugspannungen liegen in diesen Bereichen zwischen 2 MPa (gelb) und 20 MPa (dunkelrot). Die linke und die rechte Seite beziehungsweise ein Großteil der Mitte des Chips zeigen mit Spannungswerten zwischen -7 MPa (grün) und -24 MPa (violett) eher Druckspannungen. Nach dem Schleifprozess ändern sich die mechanischen Spannungen auf dem Chip. An der oberen Seite des Spannungsmesschips nimmt der Flächenanteil der Zugspannung stark ab. Auch die Spannungswerte werden mit 4 MPa (gelb) bis 8 MPa (rot) deutlich kleiner.

Dafür steigt der Flächenanteil der Zugspannungen im Bereich des entfernten Mold Compounds (linke Seite). Auf der rechten Seite des Spannungsmesschips nimmt die Druckspannung deutlich zu. Hier liegen die Werte nach dem Schleifen zwischen -13 MPa (hellblau) und -26 MPa (violett). Aus dem rechten Bild in Abbildung 119 geht hervor, dass die größten Spannungsänderungen mit 15 MPa (dunkelrot) auf der linken Seite liegen, bei der das Mold Compound entfernt wurde beziehungsweise mit -14 MPa (violett) in der oberen rechten Ecke liegen. Die Spannungsänderung in der oberen rechten Ecke kommt vermutlich durch das Einbetten und dem anschließenden Freilegen der Leads zustande.

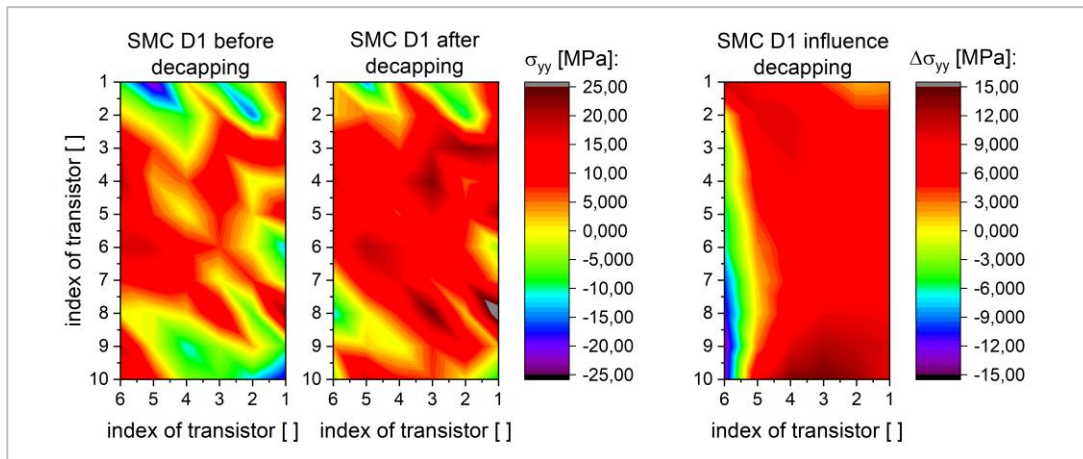


Abbildung 120: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D1 auf einer Schlieffläche zu ermöglichen

Die Abbildung 120 zeigt den Einfluss des Schleifprozesses auf die Spannung in Y-Richtung. In Y-Richtung zeigt der SMCD1 zum größten Teil Zugspannungen. Diese sind in der Mitte des Chips und sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite des Chips zu finden. Die Werte in den Bereichen liegen zwischen 2 MPa (gelb) und 22 MPa (dunkelrot). Lediglich kleine Bereiche an der oberen und unteren Seite des Chips zeigen mit Werten zwischen -5 MPa (grün) und -23 MPa (violett) Druckspannungen. Nach dem Dekapsulieren nimmt der Flächenanteil der Zugspannungen auf der Oberfläche dieses Spannungsmesschip zu. Zusätzlich nehmen auch die Werte für die Zugspannungen zu. Diese liegen nun in einem Bereich zwischen 5 MPa (orange) und 32 MPa (grau). Die Differenz der Spannung vor und nach dem Dekapsulieren im rechten Bild in Abbildung 120 zeigt, dass die mechanische Spannung nahe der dekapsulierten Chipkante überwiegend kleiner wird. Die Differenz liegt hier zwischen -3 MPa (grün) und -14 MPa (violett). Auf der restlichen Chipoberfläche nimmt die mechanische Spannung mit Werten zwischen 1,5 MPa (orange) und 14 MPa (braun) zu. Die größte Spannungszunahme ist dabei an der unteren Seite und in der Nähe der linken oberen Ecke des Chips zu beobachten (dunkelrot bis braun).

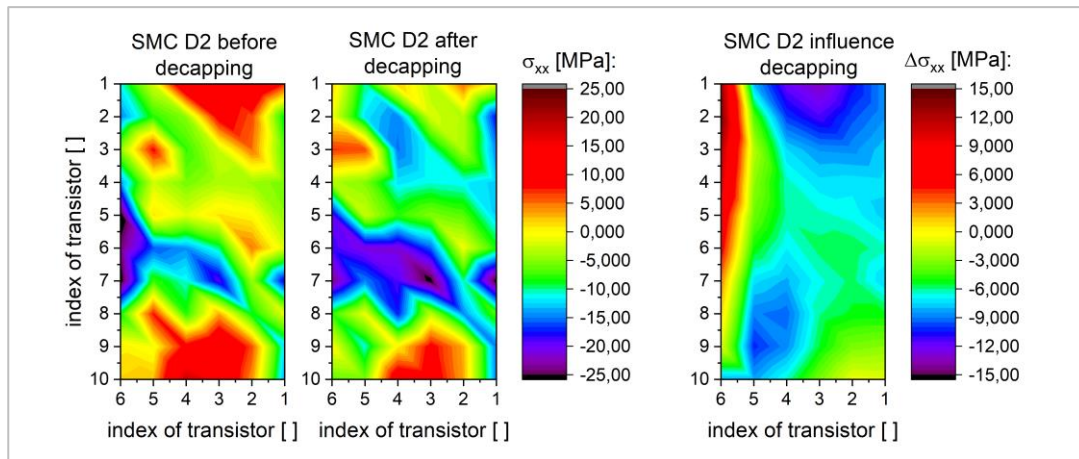


Abbildung 121: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D2 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen

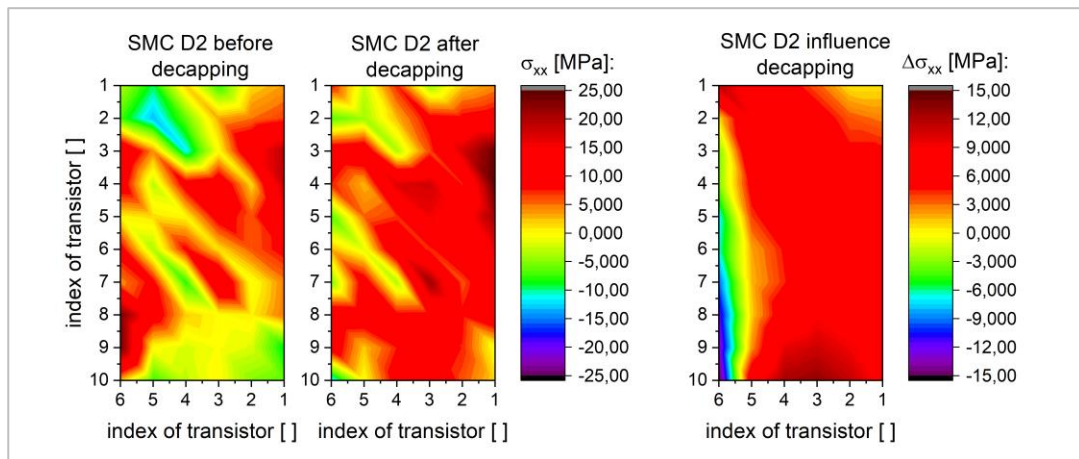


Abbildung 122: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in Y-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D2 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen

Der Einfluss des Dekapsulierens vom Spannungsmesschip SMCD2 auf die mechanische Spannung in X- (rechtes Bild in Abbildung 120) beziehungsweise in Y-Richtung (rechtes Bild in Abbildung 121) ist identisch mit dem gemessenen Einfluss des Dekapsulierens auf den Chip SMCD1. Das bedeutet, dass dieses Verfahren zum Freilegen der Chipseite für die Raman-Messung die mechanische Spannung vom Chip unabhängig beeinflusst und demnach für alle Chips gleichermaßen angenommen werden kann.

Obwohl das Mold Compound nur an einer Seite des Spannungsmesschips entfernt wurde, zeigt dennoch die komplette Oberfläche Spannungsänderungen. An der Chipseite, bei welcher dekapsuliert wurde, nimmt die mechanische Spannung in X-Richtung zu und auf dem Rest des

Chips eher ab. In Y-Richtung hingegen wird die Spannung nahe der dekapsulierten Chipseite eher kleiner und auf der restlichen Chipoberfläche größer.

Wie aus Kapitel 3.3.3. hervorgeht, ist es mit der Methode möglich einen Teil des Mold Compounds des fertig aufgebauten Chips so zu entfernen, dass Raman-Messungen an der Chipseite durchgeführt werden können. Dennoch zeigen die Ergebnisse in diesem Abschnitt, dass diese Methode zum Freilegen von Oberflächen für die Raman-Messung die mechanischen Spannungen auf dem gesamten Chip verändern. Da die mechanische Spannung unabhängig vom Chip beeinflusst wird, kann jedoch bei den Raman-Messungen, die durch die Präparation erzeugte Spannungsdifferenz, berücksichtigt werden. Es ist also möglich, die aus den Raman-Messungen bestimmte mechanische Spannung zu korrigieren. Durch den Schleifprozess ändert sich die mechanische Spannung je nach Bereich in X-Richtung zwischen 2 MPa (gelb) und 22 MPa (dunkelrot) und in Y-Richtung zwischen -5 MPa (grün) und -23 MPa (violett).

Laser-Dekapsulieren

Der schichtweise Abtrag wurde intern bei Infineon an dem Baubly-Laser durchgeführt und anschließend die resultierende Schichtdicke nach jedem Dekapsulierschritt mittels X-Ray-Tomografie der Firma General Electric (GE) bestimmt (Abbildungen 123 und 124).

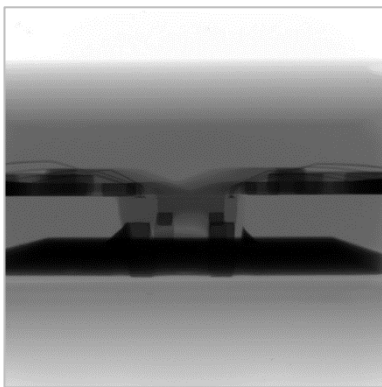


Abbildung 123: X-Ray-Tomografieaufnahme der Schichtdicke des Mold Compounds nach dem ersten Laserdekapsulierschritt (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

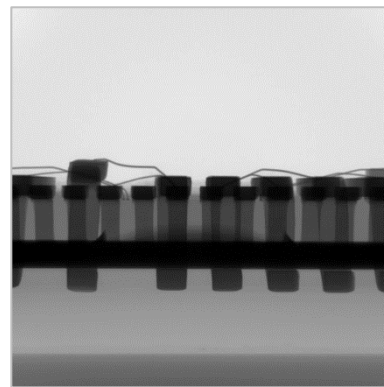


Abbildung 124: X-Ray-Tomografieaufnahme der Schichtdicke des Mold Compounds nach dem neunten Laserdekapsulierschritt (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)

Tabelle 13: Mittels X-Ray-Tomografie bestimmte Schichtdicke des Mold Compounds und die daraus berechnete abgetragene Dicke des Mold Compounds

Decapping Step [-]	Mold-Compound Thickness[mm]	Removed Mold-Compound [mm]	Removed Volume of Mold Compound [mm ³]
0	1,397	0	0
1	1,256	0,141	11,41
2	1,137	0,260	21,049
3	0,962	0,435	35,22
4	0,814	0,583	47,20
5	0,644	0,753	60,96
6	0,463	0,934	75,61
7	0,365	1,032	83,55
8	0,304	1,093	88,48
9	0,097	1,300	105,24

Nach jedem Dekapsulierschritt wurde die Spannung auf dem Spannungsmesschip mit der piezo-resistiven elektrischen Messung bestimmt. Da beim zehnten Dekapsulierschritt der Chip beschädigt wurde, lieferte der neunte Schritt die letzten verwendbaren Spannungsergebnisse.

In Abbildung 125 sind die Mittelwerte der Spannungskomponenten in X- (schwarz) und in Y-Richtung (rot) in Abhängigkeit der einzelnen Dekapsulierschritte dargestellt. Gemittelt wurden dabei die Werte der gemessenen mechanischen Spannungen aller 60 Transistoren.

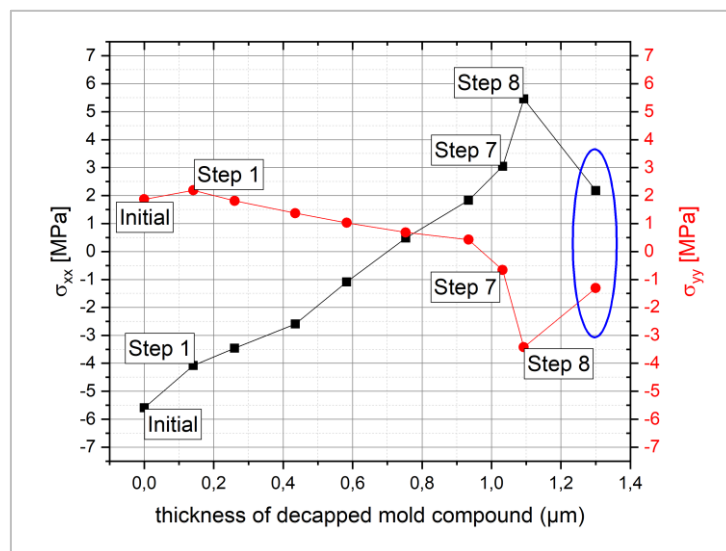


Abbildung 125: Spannungsänderung in X- und in Y-Richtung bei den einzelnen Dekapsulierschritten

Die Abbildung 125 zeigt zu Beginn des Experiments mit -5,6 MPa einen negativen Spannungswert für σ_{xx} und mit 1,9 MPa einen positiven Spannungswert für σ_{yy} . Demnach besitzt der Chip in X-Richtung überwiegend Druckspannungen und in Y-Richtung überwiegend Zugspannungen. Mit zunehmendem Abtrag des Mold Compounds wird die Druckspannung in X-Richtung immer kleiner. Beim fünften Dekapsulierschritt ändert sich das Vorzeichen der mechanischen Spannung σ_{xx} . Das bedeutet, dass der Spannungsmesschip mit einer Rest-Mold-Compound-Dicke von 0,75 μm nicht mehr überwiegend Druckspannungen zeigt, sondern nun hauptsächlich zugverspannt ist. In Y-Richtung nimmt die Zugspannung mit jedem weiteren Dekapsulierschritt ab, bis ähnlich wie bei der Spannung in X-Richtung, die Spannung nach dem fünften Dekapsulierschritt das Vorzeichen ändert und der Chip in Y-Richtung dann überwiegend Druckspannungen zeigt.

Vergleicht man den Anstieg des Graphen für die mechanische Spannung in Y-Richtung mit dem des Graphen der Spannung in X-Richtung so zeigt sich, dass der Anstieg für die Spannung in X-Richtung deutlich größer ist. Demnach ändert sich die Spannung in X-Richtung beim schrittweise Dekapsulieren deutlich stärker als die Spannung in Y-Richtung. Beim achten Dekapsulierschritt nimmt der Anstieg beider Spannungskomponenten stark zu. Geht man von einem linearen Anstieg beider Graphen aus, so ändert sich der Anstieg für die Spannung in X-Richtung von $m=8,4$ zu $m=39,6$. Für die Spannung in Y-Richtung ändert sich die Spannung von $m=-2,5$ zu $m=-45,3$. Der Grund für die starke Änderung der mechanischen Spannung in X-Richtung ist das im Vergleich zur Y-Richtung abgetragene größere Volumen des Mold Compounds, da die Kantenlänge des kompletten Bauteils in X-Richtung mehr als 1,5 Mal so lang ist wie in Y-Richtung.

Die Spannungsänderung beim neunten Dekapsulierschritt liegt nicht allein am entfernten Mold-Compound. Der Hauptgrund für das plötzliche Abfallen der Spannung in X-Richtung beziehungsweise das plötzliche Zunehmen der mechanischen Spannung in Y-Richtung ist das Einbetten des Chips in Epoxidharz. Dieses war notwendig, um zu verhindern, dass die Leads des Chips bei den weiteren Dekapsulierschritten abfallen und somit der Chip nicht mehr elektrisch über die Leads gemessen werden kann. Dazu wurde der Spannungsmesschip mit den Leads durch eine dünnen Schicht Epoxidharz auf einem Objektträger fixiert. Aus diesem Grund werden für die nachstehenden Auswertungen lediglich die ersten acht Dekapsulierschritte in Betracht gezogen, da es beim neunten Schritt nicht möglich ist, den Einfluss des Einbettens vom Einfluss des Entferns des Mold Compounds zu trennen.

In der nachfolgenden Abbildung 126 ist der Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung dargestellt. Vor dem Dekapsulieren besitzt der Spannungsmesschip an der oberen und unteren Seite überwiegend Zugspannungen im Bereich von 1 MPa (gelb) bis 22 MPa (dunkelrot). Der Rest der Oberfläche dieses Chips ist mit Spannungswerten zwischen -2 MPa (grün) und -35 MPa (violett) druckverspannt. Nach dem achten Dekapsulierschritt sind die Bereiche mit Druckspannungen deutlich kleiner geworden. Lediglich die linke Seite und die untere rechte Ecke sind druckverspannt. Die Werte der Druckspannung liegen hier im Bereich von -2 MPa (hellgrün) bis -12 MPa (grün). Der Chip zeigt nun hauptsächlich Zugspannungen mit Werten zwischen 4 MPa (gelb) und 27 MPa (dunkelrot).

Wie im rechten Bild der Abbildung 126 zu erkennen ist, tritt die größte Änderung der mechanischen Spannung beim Dekapsulieren in der Mitte des Chips auf. Die Spannungsdifferenz liegt zwischen 10 MPa (dunkelrot) und 17 MPa (braun). Die obere und untere Seite des Chips zeigt mit 5 MPa (orange) vergleichsweise geringe Spannungsänderungen.

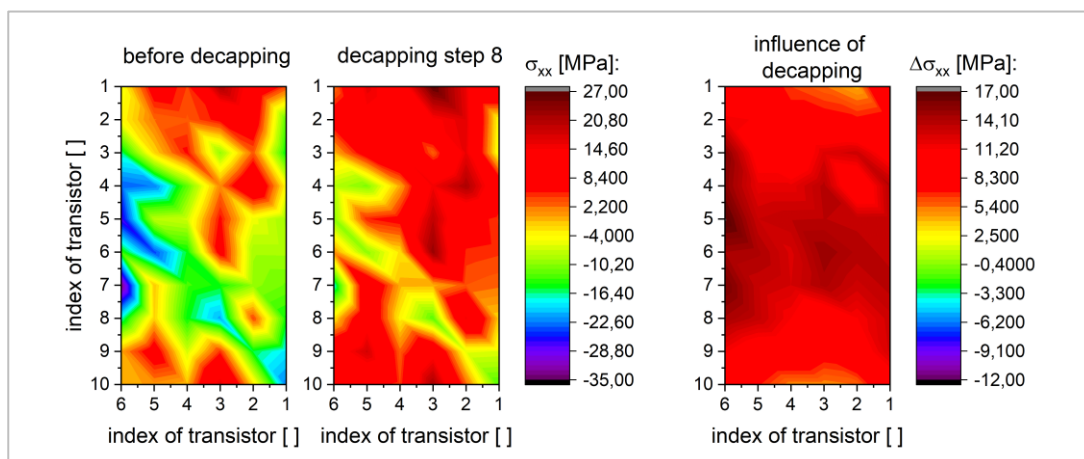


Abbildung 126: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} zwischen ursprünglicher intrinsischer Spannung und der Spannung nach dem achten Dekapsulierschritt

Die Abbildung 127 zeigt die mechanische Spannung in Y-Richtung vor dem Dekapsulieren, nach dem achten Dekapsulierschritt und die Differenz zwischen den beiden Spannungsbildern.

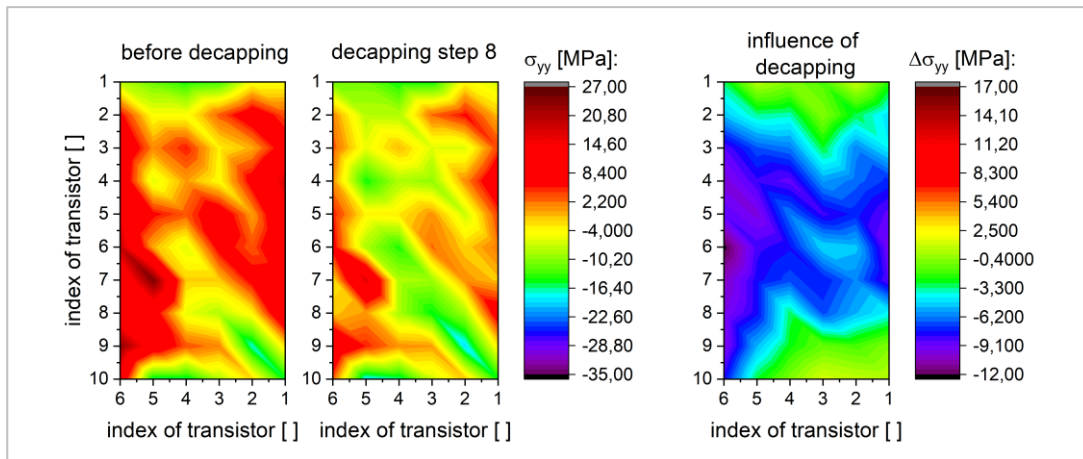


Abbildung 127: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} zwischen ursprünglicher intrinsischer Spannung und der Spannung nach dem achten Dekapsulierschritt

Vor dem Experiment besitzt der Chip in Y-Richtung zum Großteil Zugspannungen. Lediglich an der oberen und unteren Seite des Spannungsmesschips sind Bereiche mit Druckspannungen zu erkennen. Die Werte in den Druckspannungsbereichen liegen zwischen -3 MPa (hellgrün) und -17 MPa (hellblau). Die Zugspannungen sind im Bereich von 3 MPa (gelb) und 25 MPa (dunkelrot). Nach dem achten Dekapsulierschritt sind nur die rechte und die linke Seite des Chips mit Werten zwischen 2 MPa (gelb) und 17 MPa (dunkelrot) zugverspannt. Insgesamt sind die Werte der Zugspannungen kleiner geworden. Die obere und untere Seite sowie die Mitte zeigt nun Druckspannungen im Bereich von -5 MPa (hellgrün) bis -19 MPa (hellblau). Ähnlich wie bei der Auswertung der Differenz der mechanischen Spannung in X-Richtung (Abbildung 126) zeigt die Differenz der mechanischen Spannung in Y-Richtung auch die größte Änderung in der Mitte des Chips. In Y-Richtung liegen die Änderungen zwischen -5 MPa (hellblau) und -12 MPa (schwarz).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Änderung der mechanischen Spannung auf dem Chip mit bis -12 MPa in Y-Richtung und bis zu 17 MPa in X-Richtung durch das flächige Entfernen des Mold Compounds sehr groß ist. Dadurch ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, die Oberfläche für die Raman-Spektroskopie-Messungen freizulegen, ohne die mechanische Spannung zu beeinflussen.

Mikrofräse

Die Ergebnisse aus der piezo-resistiven elektrischen Messung des ersten Versuchs mit zwanzig gefrästen Löchern zeigt, dass das entfernte Mold Compound den Spannungszustand erheblich ändert (Abbildungen 128 und 129).

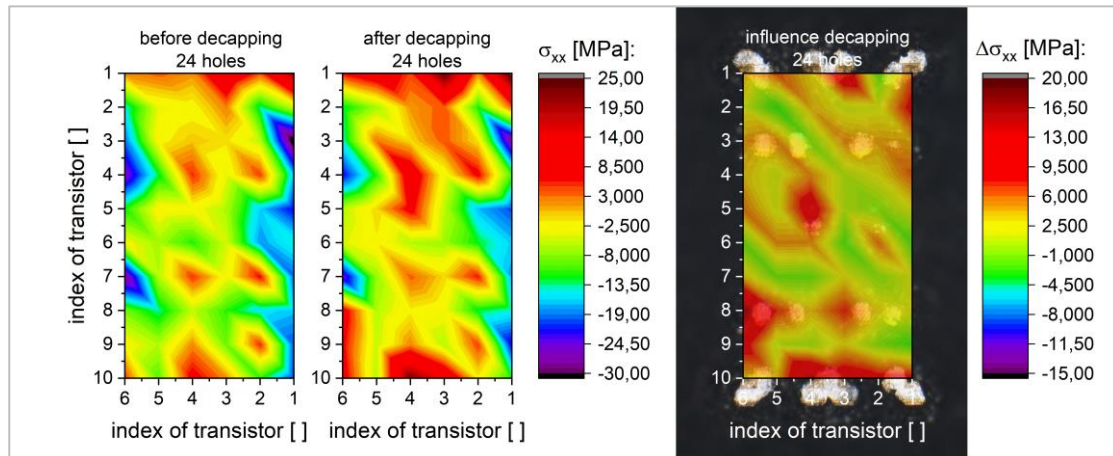


Abbildung 128: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Die Abbildung 128 zeigt, dass sich nach dem Dekapsulieren der 24 Löcher die druckverspannten Flächen an den langen Seiten in der Nähe der Löcher verkleinert haben. In diesen Bereichen nimmt die Druckspannung von -8 MPa (hellblau) bis -32 MPa (schwarz) auf von -4 MPa (hellblau) bis -28 MPa (violett) ab. Auf den beiden linken Bildern in Abbildung 128 ist zusätzlich zu erkennen, dass die Zugspannung in der Mitte und an den kurzen Seiten des Spannungsmesschips größer wird. Die mechanischen Spannungswerte in der Nähe der gefrästen Löcher steigen von 5 MPa (orange) bis 20 MPa (dunkelrot) auf 6 MPa (orange) bis 27 MPa (braun). Die Überlagerung der Spannungsdifferenz mit dem Videobild der 24 Löcher zeigt, dass sich die Spannung hauptsächlich an den Transistoren ändert, welche in der Nähe der dekapsulierten Löcher liegen. Die Spannungsdifferenz auf der restlichen Oberfläche des Chips liegt im Bereich von 3 MPa (gelb) bis -3 MPa (grün). An den Stellen, bei welchen sich die Löcher befinden ändert sich die Spannung zwischen 5 MPa (orange) und 17 MPa (rot).

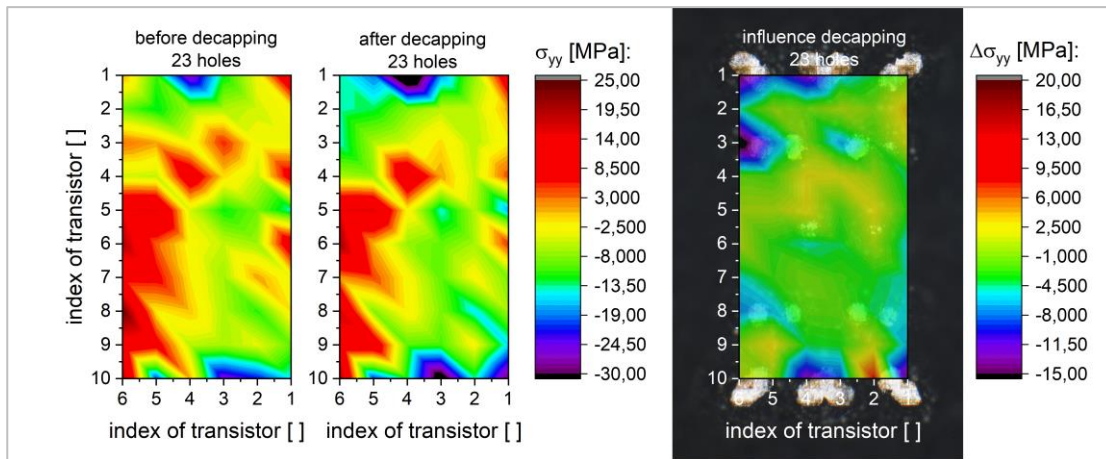


Abbildung 129: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Vergleicht man die mechanischen Spannungen vor und nach dem Fräsen der 24 Löcher aus Abbildung 129 miteinander, so erkennt man auch hier, dass sich die Spannungen in den Bereich um die Löcher ändern. Die Spannungsänderungen in Y-Richtung sind im Vergleich zu den Spannungsänderungen in X-Richtung nicht so deutlich. Der Flächenanteil der Zugspannung in der Mitte des Chips nimmt leicht ab. Vor dem Dekapsulieren liegt die Spannung in einem Bereich von 1 MPa (orange) bis 16 MPa (dunkelrot). Nach dem Dekapsulieren ändert sich die mechanische Spannung auf 0,3 MPa (orange) bis 15 MPa (dunkelrot). Auch im rechten Bild aus Abbildung 126 ist zu sehen, dass sich die Spannung auf dem Großteil der Chipoberfläche nur geringfügig ändert. Die Änderung liegt hier zwischen 3 MPa (gelb) und -4 MPa (grün). Lediglich an den kurzen Seiten des Chips sind die Änderungen der Spannung mit Differenzen zwischen -6 MPa (hellblau) und -17 MPa (schwarz) größer.

Vergleicht man beide Abbildungen miteinander, so erkennt man, dass die Farben in Abbildung 128 der Spannungskomponente in X-Richtung eher positive Werte zeigen und in Y-Richtung hingegen eher negative Werte. Dies bedeutet, dass die Spannungen in X-Richtung nach dem partiellen Dekapsulieren kleiner geworden sind und die Spannungen in Y-Richtung größer geworden sind.

Besonders deutlich wird das auch beim Betrachten der folgenden 3D-Diagramme aus den Abbildungen 130 und 131. Die rote Ebene stellt die mechanischen Spannungen im Chip vor und die blaue Ebene die Spannungen im Chips nach dem partiellen Dekapsulieren dar.

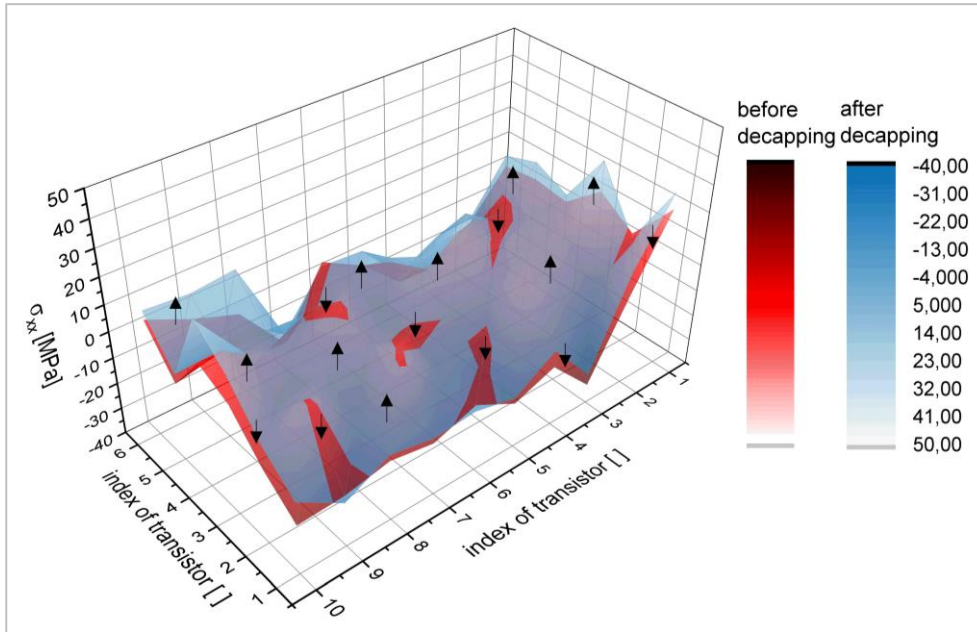


Abbildung 130: 3D-Flächendiagramm der Spannungen in X-Richtung vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Aus der Abbildung 130 wird ersichtlich, dass die Spannungsebene des Chips nach dem partiellen Dekapsulieren zum größten Teil über der Spannungsebene des Chips vor dem Experiment liegt (Pfeile nach oben). Lediglich vereinzelt sind rote Bereiche zu sehen. Daraus folgt, dass die mechanische Spannung in X-Richtung nach dem Dekapsulieren auf dem größten Teil des Spannungsmesschip angestiegen ist.

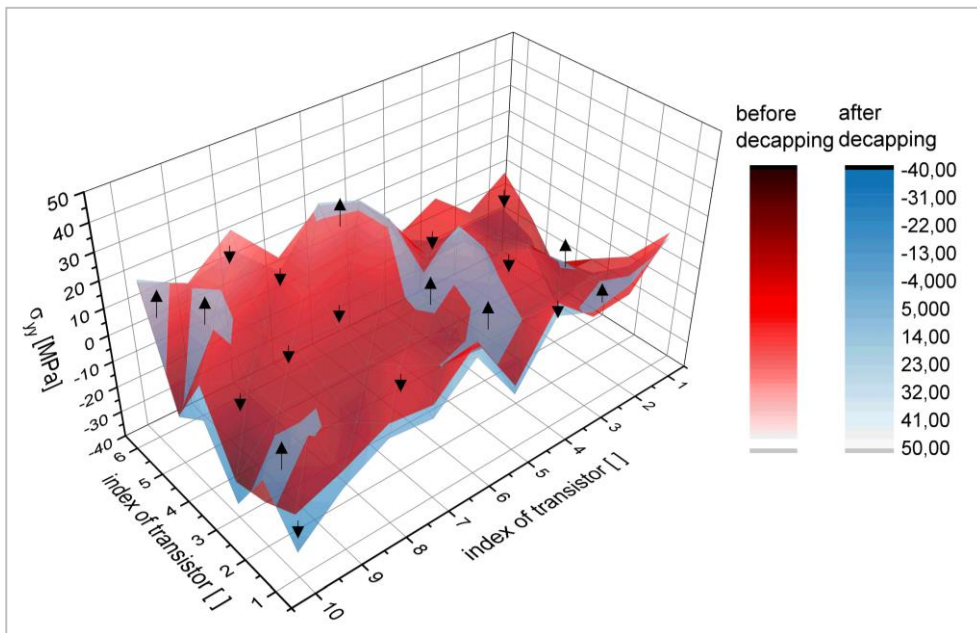


Abbildung 131: 3D-Flächendiagramm der Spannungen in Y-Richtung vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Genau anders herum verhält es sich bei der Spannung in Y-Richtung in Abbildung 131. Hier liegt die Ebene der Spannung vor dem partiellen Dekapsulieren (rot) zum Großteil über der Ebene der Spannung nach dem partiellen Dekapsulieren (blau). Die meisten der eingezeichneten Pfeile zeigen nach unten, was deutlich macht, dass die Spannung in Y-Richtung nach dem Fräsen der Löcher eher kleiner geworden ist.

Es zeigt sich hier deutlich, dass das Fräsen der 24 Löcher die Spannung auf dem Chip beeinflusst. Die Spannungsänderung ist auf dem Großteil des Chips mit Differenzen zwischen 4 MPa (grün) und -3 MPa (gelb) relativ klein. Allerdings ändert sich die Spannung deutlich in den Bereichen in der Nähe der Löcher, bei welchen die mechanische Spannung mittels Raman-Spektroskopie bestimmt werden soll. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der gefrästen Löcher auf ein Minimum von sechs Löchern reduziert.

Die Auswertungen der Spannungskomponenten in X- und in Y-Richtung zeigen, dass sich die Spannungsänderungen nach dem partiellen Dekapsulieren in beiden Richtungen reduziert haben. (Abbildungen 132 und 133). Vergleicht man die beiden linken Bilder in Abbildung 132 miteinander, so erkennt man kaum Unterschiede. Demnach ist die Spannungsänderung auf dem Großteil des Spannungsmesschips sehr gering. Lediglich am oberen und unteren Rand werden die Bereiche mit Zugspannungen größer und am linken mittleren Rand die Druckspannungsbereiche kleiner. Die Werte der Bereiche mit Zugspannung ändern sich von 6 MPa (orange) bis 16 MPa (rot) vor dem Fräsen zu 7 MPa (orange) bis 32 MPa (grau) nach dem Fräsen. Der Wertebereich der Zugspannungen ändert sich von -12 MPa (hellblau) bis -27 MPa (violett) in -15 MPa (hellblau) bis -29 MPa (violett).

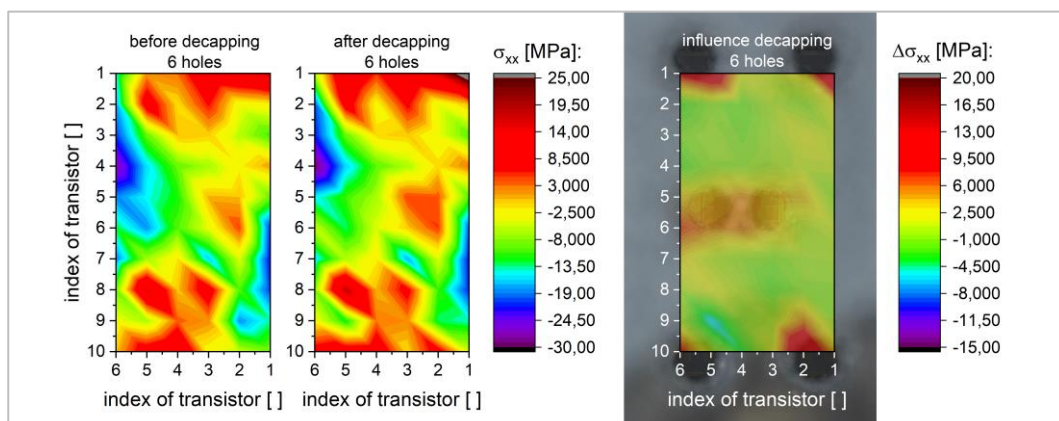


Abbildung 132: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Wie im rechten Bild in Abbildung 132 zu sehen ist, stimmen die Positionen der maximalen Spannungsänderungen mit den Bereichen überein, bei welchen das Mold-Compound entfernt wurde. Die Spannungsdifferenz durch das Fräsen beträgt in diesen Bereichen in X-Richtung 3 MPa (gelb) bis 16 MPa (rot). Die Spannungsdifferenz auf dem Rest der Chips liegt in einem Bereich von -2 MPa (hellgrün) bis 2 MPa (gelb).

In Abbildung 133 ist der Einfluss des Fräsens der sechs Löcher auf die mechanische Spannung in Y-Richtung dargestellt. Ähnlich wie bei der Spannung in X-Richtung aus Abbildung 133 sind beim Vergleichen der beiden linken Abbildungen kaum Unterschiede zu erkennen. Demnach ändert sich auch die Spannung in Y-Richtung auf dem Großteil der Chipoberfläche nur sehr wenig. Leichte Änderungen sind auch hier nur im Bereich der gefrästen Löcher zu erkennen. Der Bereich mit Zugspannung am oberen und unteren Rand wird kleiner und die Werte in diesen beiden Bereichen ändern sich von -11 MPa (hellblau) bis -26 MPa (violett) in -17 MPa (blau) in -27 MPa (violett).

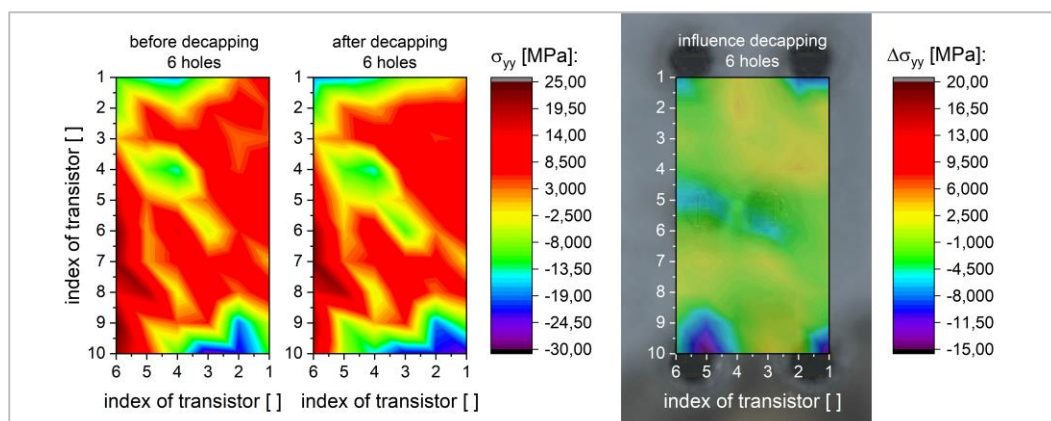


Abbildung 133: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren

Die Spannungsdifferenz in den Bereichen, bei welchen das Mold Compound entfernt wurde liegt zwischen -5 MPa (hellblau) und -14 MPa (violett). Der Rest der Chipoberfläche zeigt eine mechanische Spannung im Bereich von -2 MPa (hellgrün) bis 3 MPa (gelb). Erstaunlicherweise sind die Spannungsdifferenzen sowohl in X- als auch in Y-Richtung der beiden gefrästen Löcher in der Mitte des Chips deutlich geringer als bei den vier Löchern am Rand. Vermutlich verhindert das größere Volumen des Mold Compounds um die beiden Löcher, im Vergleich zu den gefrästen Löchern außen am Chip, größere Spannungsänderungen. In den folgenden Abbildungen 134 und 135 sind die Vergleiche der Spannungsdifferenzen nach 24 beziehungsweise nach 6 gefrästen Löchern auf beiden Chips in einem Histogramm dargestellt.

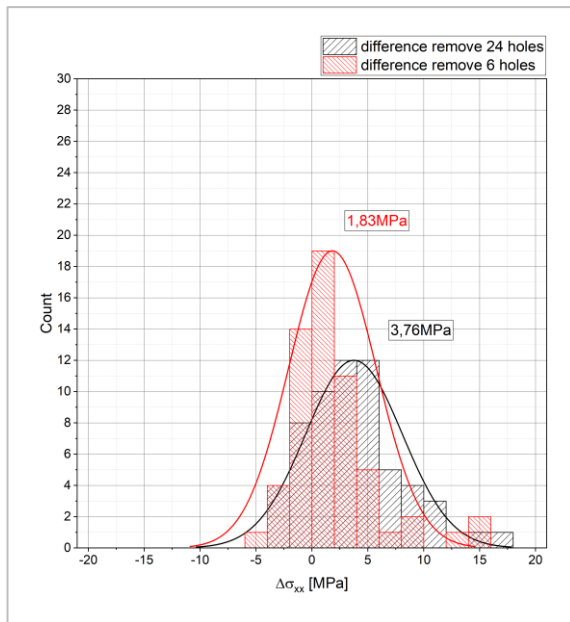


Abbildung 134: Vergleich der Histogramme von der Spannung in X-Richtung bei 6 und 24 gefrästen Löchern

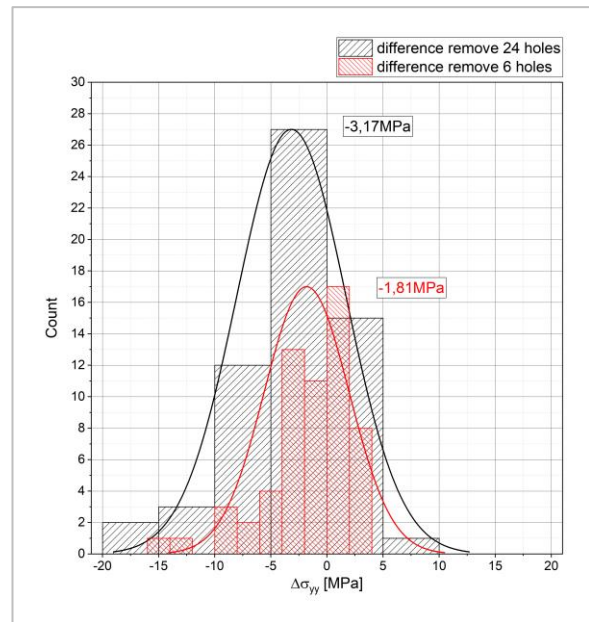


Abbildung 135: Vergleich der Histogramme von der Spannung in Y-Richtung bei 6 und 24 gefrästen Löchern

Aus dem Vergleich beider Histogramme für die mechanische Spannung in X- und in Y-Richtung geht hervor, dass die Differenz der Spannung nach 6 Löchern im Mittel deutlich kleiner ist, als die Spannungsdifferenz nach 24 Löchern. Der Mittelwert der Spannungsdifferenz über dem gesamten Chip nach 24 Löchern beträgt in X-Richtung 3,76 MPa und der Mittelwert der Spannungsdifferenz nach 6 Löchern 1,83 MPa. In Y-Richtung steht dem Mittelwert von -3,17 MPa nach 24 gefrästen Löchern ein Mittelwert von -1,81 MPa nach 6 gefrästen Löchern gegenüber. Die mittlere Spannungsänderung hat sich also durch das Reduzieren von 24 auf 6 Löcher halbiert. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der hohen Spannungsdifferenzen ab und die Anzahl der geringen Differenzen der Spannungen zu. Erkennbar ist dies an der geringeren Halbwertsbreite der angenommenen Gaußverteilung der Spannungsdifferenzen nach 6 Löchern in Vergleich zu den Spannungsdifferenzen nach 24 Löchern. Eine Reduzierung der Anzahl der Löcher führt demnach zu einer Verringerung des Einflusses auf den gesamten Chip. An den Stellen auf dem Chip, an denen das Mold Compound entfernt wurde, bleibt der Einfluss des Fräsens unabhängig von der Anzahl der Löcher gleich. Die Differenz der mechanischen Spannung in diesen Bereichen liegt in X-Richtung zwischen 3 MPa und 17 MPa und in Y-Richtung zwischen -5 MPa und -17 MPa.

3.6. Simulationsergebnisse der verschiedenen Experimente

Für die Simulation wurde das Finite-Elemente-Modell verwendet, welches in Kapitel 2.4.2. näher beschrieben wurde. Um die Ergebnisse aus der Simulation mit den Raman-Messungen vergleichen zu können, wurden die mechanischen Spannungen der Hauptkomponenten σ_{xx} und σ_{yy} graphisch dargestellt (Chen, et al., 2005). Für den Vergleich mit den piezo-resistiven Messungen wurden sowohl die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} verwendet als auch die Summen beziehungsweise die Differenzspannung, da diese direkt vom Spannungsmesschip ausgegeben werden.

3.6.1. Simulation der Prozessschritte

Als erster Schritt wurde damit begonnen den Aufbau des Spannungsmesschips zu simulieren, da alle anderen Simulationen, wie beispielsweise die Simulation des partiellen Dekapsulierens, auf dieser Simulation aufbauen. Bei den prozessbegleitenden optischen Mikroskopaufnahmen wurde festgestellt, dass die Meniskusdicke des Die Attach zwischen 50 μm und 300 μm liegt. Daher wurde für die anschließenden Simulationen eine mittlere Meniskusdicke von 150 μm angenommen.

Die folgende Abbildung 136 zeigt den simulierten Einfluss des Die Attach und des Wirebond-Prozesses auf die Oberfläche des Chips. Da der Einfluss des Mold Compound-Prozesses aufgrund des verbogenen Leadframes nicht mit der Raman-Spektroskopie gemessen werden konnte, wird dieser hier beim Vergleich mit der Simulation nicht näher betrachtet, sondern nur auf die Ergebnisse aus den Simulationen eingegangen. Für den Vergleich mit den Raman-Messungen werden zunächst die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} auf der Chipoberfläche dargestellt.

Aus der Abbildung 136 geht hervor, dass sich die Spannung nach dem Die Attach-Prozess in der Mitte des Chips am stärksten ändert und zum Rand des Chips parallel zur Y-Richtung abnimmt. Die Zugspannung in X-Richtung in der Mitte des Chips deutet mit einer mechanischen Spannung von bis zu 125 MPa auf eine konvexe Biegung des Spannungsmesschips hin. Auch in Y-Richtung liegt das Maximum der mechanischen Spannung in der Mitte des Chips und nimmt dort parallel zur X-Richtung der Chipkante ab. Hier liegt der maximale Spannungswert bei 100 MPa. Das bedeutet, dass der Chip auch in Y-Richtung konvex verbogen ist. Nach dem Wirebond-Prozess nimmt die Spannung auf dem Chip sowohl

in X- als auch in Y-Richtung ab. Ähnlich wie beim Die Attach ändern sich auch hier die mechanischen Spannungen in der Mitte des Chips am größten und nehmen in X-Richtung parallel zur X-Achse ab und in Y-Richtung parallel zu Y-Achse ab. Das Maximum von σ_{xx} liegt bei 75 MPa und von σ_{yy} bei 70 MPa.

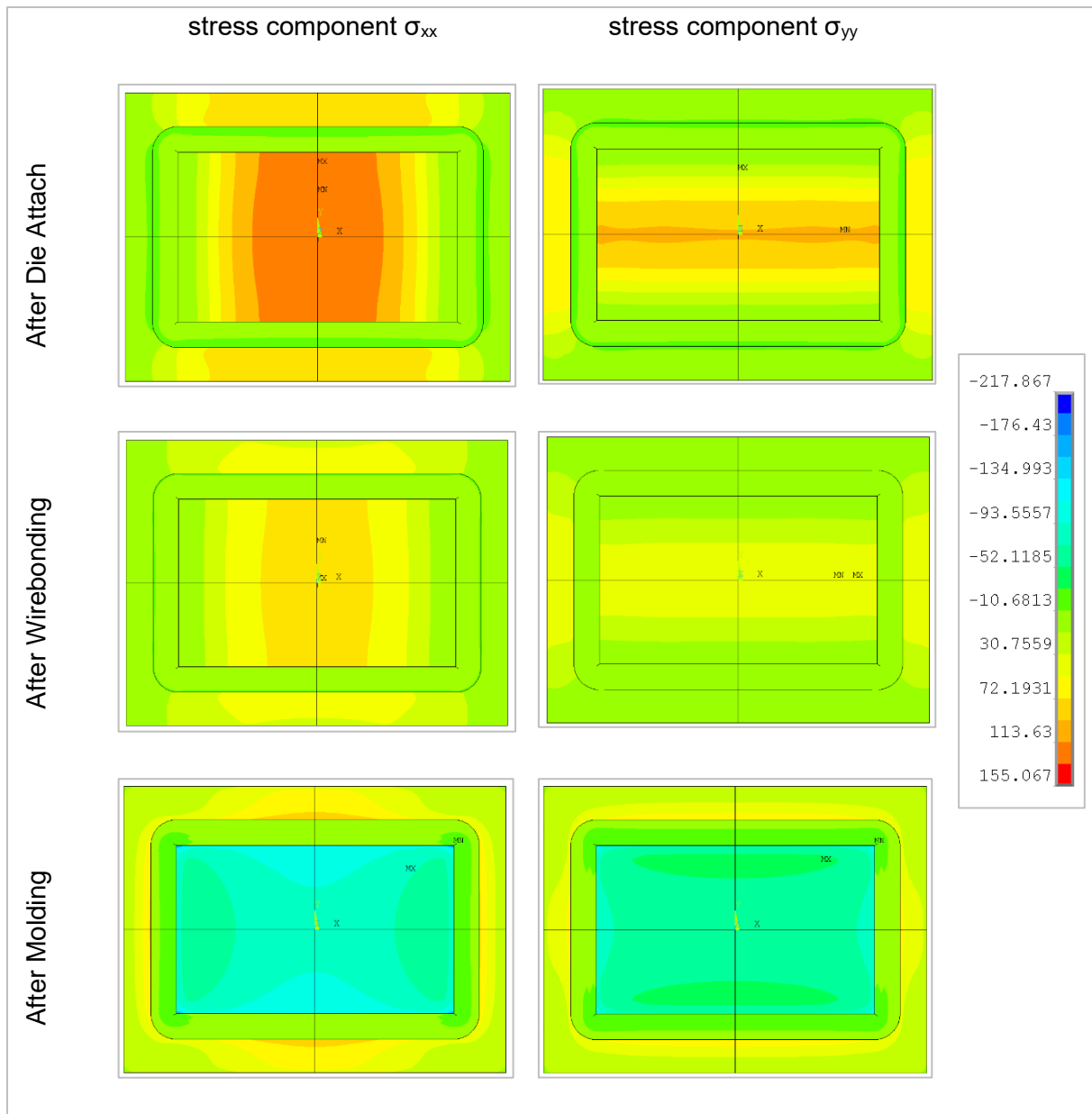


Abbildung 136: Mechanische Spannungen auf der Chipoberfläche in X- (links) und Y-Richtung (rechts) der einzelnen Prozessschritte

Die Simulation des Mold-Prozesses zeigt eine deutliche Änderung der mechanischen Spannung sowohl in X- als auch in Y-Richtung. Die Chipoberfläche weist nach dem Molding nun Druckspannung auf. Das Maximum der mechanischen Spannung steigt in X-Richtung auf -107 MPa und in Y-Richtung auf bis zu -76 MPa und liegt nach dem Mold-Prozess nicht mehr im Zentrum des Chips, sondern am Rand. Das Spannungsmaximum der Komponente σ_{yy} liegt an der rechten beziehungsweise linken kurzen Seite des Chips. Der höchste Wert von σ_{xx} liegt hingegen an den langen Seiten des Chips.

Die Abbildung 137 zeigt die simulierte mechanische Spannung an der langen Chipseite. Diese Spannungsbilder dienen als Vergleich zur Raman-Messung an den geschliffenen Spannungsmesschips.

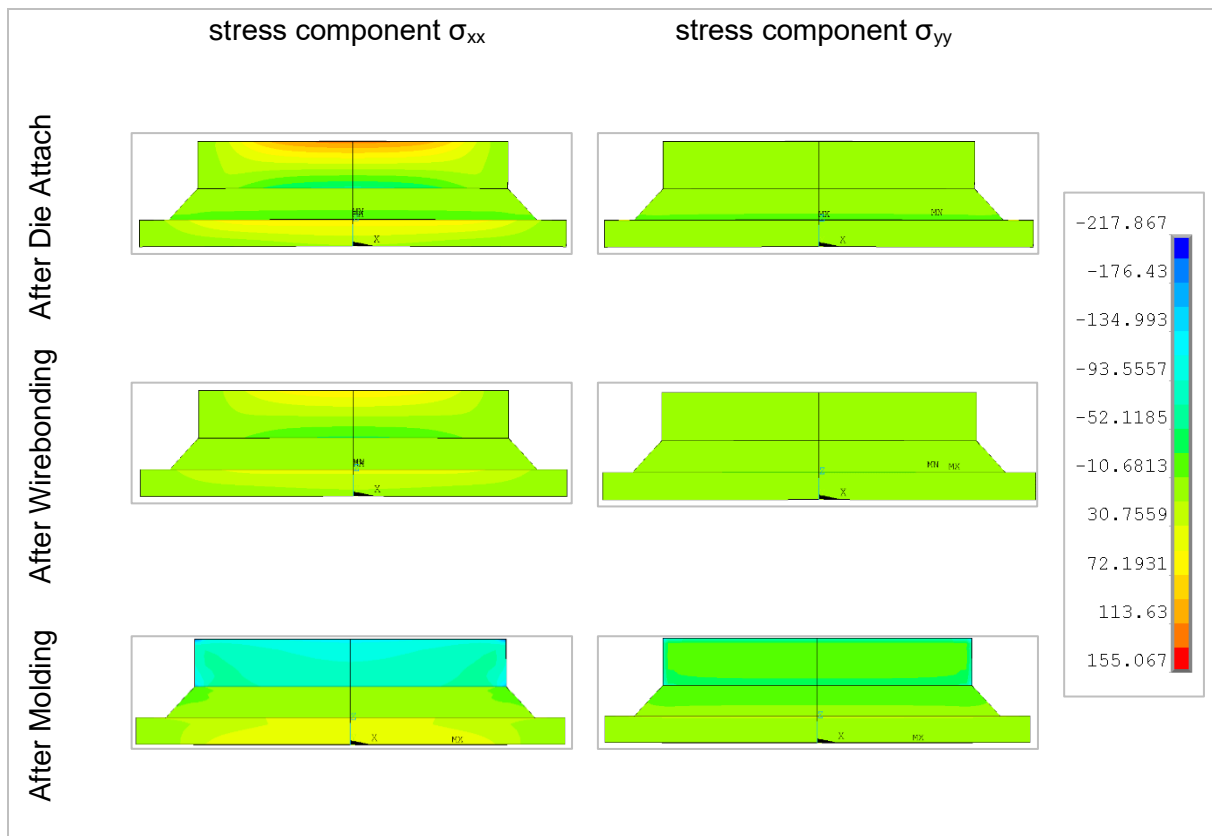


Abbildung 137: Mechanische Spannungen auf der Chipseite (XZ-Ebene) in X- (links) und Y-Richtung (rechts) der einzelnen Prozessschritte

Der simulierte Einfluss der jeweiligen Prozesse auf die mechanische Spannung in Y-Richtung zeigt kaum Änderungen im Spannungsbild. Der Grund dafür ist, dass die dargestellte Fläche die XZ-Ebene ist und sich hier die Spannung in Y-Richtung kaum ändert. Die mechanische Spannung an der Chipseite liegt bei -10 MPa (grün). Lediglich nach dem Mold Compound-

Prozess sind Änderungen der Spannung zu erkennen. Am Rand der Chipseite ist die mechanische Spannung mit -60 MPa (hellblau) leicht erhöht.

Nach dem Die Attach zeigt die Chipseite an der Chipoberfläche mechanische Spannungen in X-Richtung im Bereich von 127 MPa (orange) bis 67 MPa (gelb). An den äußeren oberen Ecken beträgt der Wert der Spannung in X-Richtung 4 MPa (grün). Die Spannung an der Oberseite des Chips nimmt somit nach außen hin ab. Demnach zeigt die Fläche an der Chipoberkante genauso wie bei der Simulation auf der Chipoberfläche Zugspannungen. An der Grenze zum Die Attach liegen die Spannungswerte zwischen -85 MPa (hellblau) und -27 MPa (hellgrün). Die Seite des Chips ist in diesem Bereich druckverspannt. Nach dem Wirebond-Prozess nimmt die Spannung an der Chipoberfläche und in der Nähe des Die Attach ab. Die mechanischen Spannungen in der Nähe der Oberfläche liegen in einem Bereich bei 71 MPa (gelb) bis 24 MPa (grün) und am Die Attach zwischen -31 MPa (dunkelgrün) und -16 MPa (grün). Ähnlich wie bei der Auswertung der Simulation auf der Chipoberfläche, ist der Einfluss vom Mold Compound auf die mechanische Spannung an der Chipseite sehr groß. Das Maximum ist an den oberen Ecken des Chips zu finden und liegt bei -170 MPa (dunkelblau). In der Mitte der Chipoberseite ist die Spannung mit -96 MPa (hellblau) geringer. In Richtung des Die Attach und zu den Chipaußenseiten nimmt die Spannung weiter ab. In der Nähe des Die Attach liegt die Spannung bei -85 MPa (grünblau) und an den Seiten des Chips zwischen -30 MPa (hellblau) und -67 MPa (blau).

Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation mit der Raman-Spektroskopie

Der Vergleich der Spannungssimulation an den Chipseiten mit den Raman-Messungen an den angefertigten mechanischen Schliffen zeigt für den Prozessschritt des Die Attach Übereinstimmungen im Verlauf der mechanischen Spannungen. Darüber hinaus zeigt sowohl der simulierte Chip als auch der mittels Raman-Spektroskopie gemessene Chip an der Oberkante Zugspannungen (Abbildung 138 (A)). Der Vergleich der Absolutwerte der mechanischen Spannungen beider Verfahren zeigt jedoch einen Unterschied von bis zu 80 MPa. Allerdings wird aus den Raman-Messungen auch die uniaxiale Spannung abgeleitet und nicht die einzelnen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} .

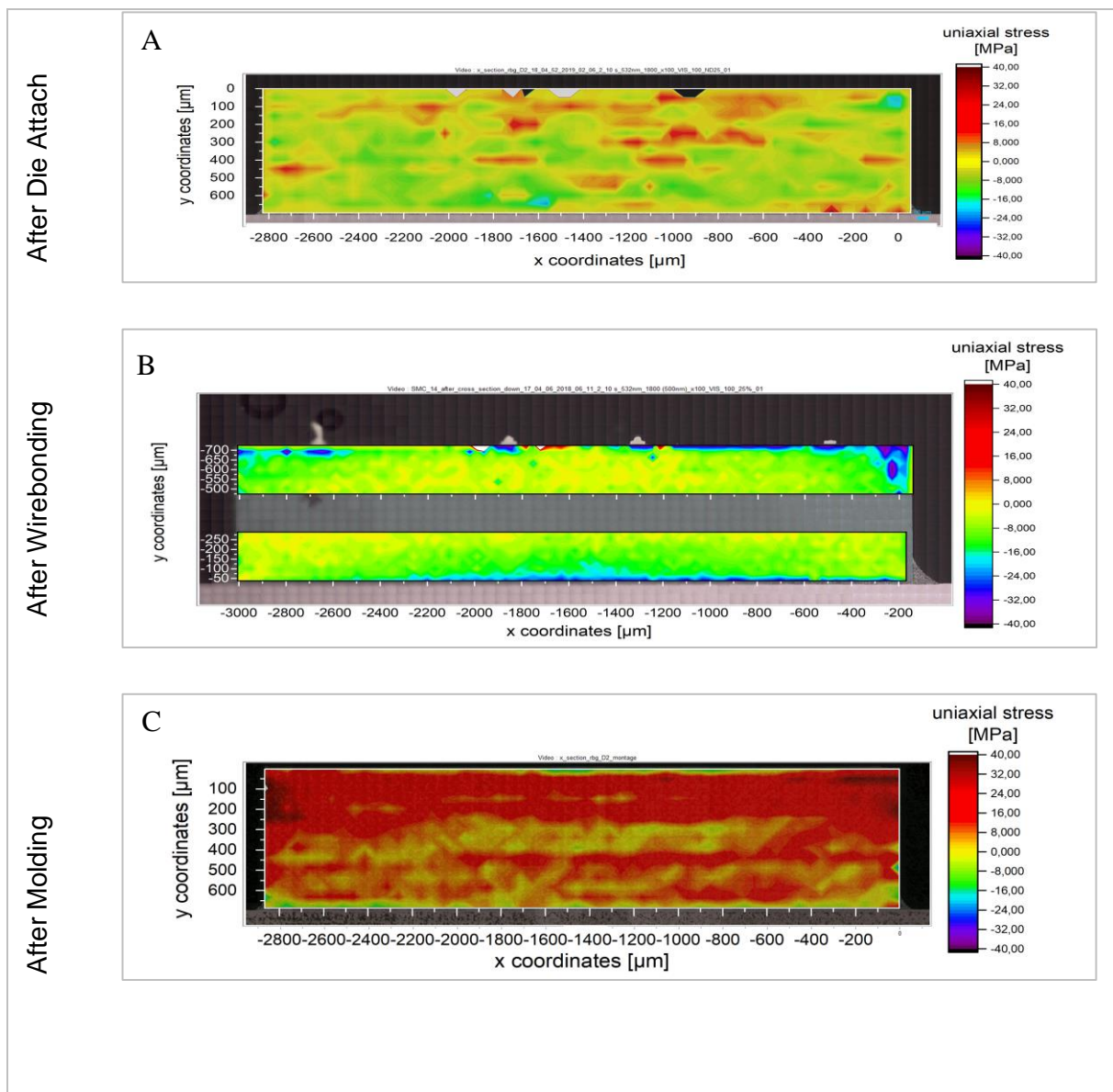


Abbildung 138: Ergebnisse der Raman-Messungen aus Kapitel 3.3.3. „Partielle Dekapsulierung

Am Interface zum Die Attach sind in der Simulation Druckspannungen zu erkennen. Auch bei den Raman-Messungen sind am Interface zwischen dem Die Attach und dem Chip Druckspannungen zu sehen. Allerdings sind die Bereiche mit Druckspannungen bei den Raman-Messungen deutlich kleiner und auch nur in der Nähe der Unterkante des Chips zu erkennen, da auch hier ein Teil des Klebers für die Messungen mit dem Raman-Spektrometer entfernt wurde (Abbildung 138 (A)). Genauso wie an der Chipoberseite unterscheiden sich auch hier die simulierten Spannungen von den Spannungswerten, welche mit dem Raman-Spektrometer bestimmt wurden. Der Grund ist ebenfalls die Betrachtung der uniaxialen

Spannung bei den Raman-Messungen im Gegensatz zu den Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} bei der Simulation. Der Unterschied der Werte zwischen Simulation und Raman-Messungen liegt bei 60 MPa.

Vergleicht man die Simulation des Wirebond-Prozesses mit den Raman-Messungen, so fällt auf, dass sich die Spannungsverläufe an der Grenzschicht zum Die Attach ähneln. Sowohl die Simulation als auch die Raman-Messungen zeigen hier Druckspannungen. Die aus der Raman-Spektroskopie bestimmten Spannungen am Interface zwischen Chip und Kleber liegen zwischen -10 MPa (hellgrün) und -30 MPa (dunkelblau) (Abbildung 138 (B)). Damit stimmen die Spannungswerte der Raman-Messungen mit den Spannungswerten der Simulation überein. Bei der Betrachtung der Oberkante des Chips beider Verfahren gibt es jedoch deutliche Unterschiede. Besonders die Spannungen in der rechten oberen Ecke, welche aus den Raman-Messungen bestimmt wurden, weichen mit -40 MPa (violett) deutlich von den -10 MPa aus der Simulation ab. In der rechten oberen Ecke gibt es ebenfalls violette Bereiche, bei welchen die berechnete Spannung aus den Raman-Messungen stark von der Simulation abweicht. Betrachtet man die Areale um die violetten Stellen herum, so liegen die Spannungswerte der Raman-Messungen mit -8 MPa (grün) bis -13 MPa (grün) sehr nahe an den -10 MPa aus der Simulation. Zusätzlich ist bei den Raman-Messungen der Einfluss der Bumps deutlich zusehen. Dieser wurde in dem Finite Elemente Modell dieser Simulation nicht berücksichtigt.

Die Spannungswerte der Raman-Messungen in der Mitte der Chips nach dem Wirebond-Prozess liegen zwischen 20 MPa (rot) und -2 MPa (gelb) (Abbildung 138 (B)). Im Vergleich dazu liegen die Spannungswerte der Simulation aus Abbildung 137 zwischen 71 MPa und 24 MPa. Der Grund für die Differenz zwischen der Simulation und den Raman-Messungen von bis zu 50 MPa ist wahrscheinlich die Metallisierung auf der Chipoberfläche, welche bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde. Die Metallisierung beeinflusst nicht nur die mechanische Spannung in der Nähe der Chipoberseite, sondern durch das unterschiedliche Steifigkeitsverhalten im Vergleich zum Silizium auch das Verhalten des Chips nach den einzelnen Prozessschritten.

Der Vergleich der berechneten Spannungen aus den Raman-Messungen in Abbildung 138 (C) mit der Simulation in Abbildung 137 zeigt sehr starke Differenzen. Vermutlich wird hier die Spannung auf der Chipseite durch das Entfernen des Mold Compounds stark beeinflusst. Die mechanischen Spannungen, welche mittels Raman-Spektroskopie bestimmt wurden, liegen auf der Chipseite zwischen 3 MPa (gelb) und 25 MPa (rot). Betrachtet man die mechanischen Spannungen aus der Simulation von der Chipmitte mit Werten zwischen -85 MPa und -96 MPa,

so liegt die Differenz zwischen den Raman-Messungen und der Simulation zwischen 88 MPa und 121 MPa. Ein weiterer Unterschied ist die unterschiedliche Richtung der Spannung beider Messverfahren. Die Chipseite der Simulation zeigt überwiegend Druckspannung und die Chipseite der Raman-Messungen zeigt überwiegend Zugspannungen. Lediglich vereinzelt tauchen Bereiche mit Druckspannungen auf. Diese liegen in der Mitte des Chips an der Grenzschicht zum Die Attach auf der Chipoberseite. Demnach hat das Entfernen des Mold Compounds durch das mechanische Schleifen einen großen Einfluss auf die mittels Raman-Spektroskopie gemessene mechanischen Spannung auf der Chipseite. Lediglich an den äußeren Rändern des Chips stimmt die Richtung der Spannung mit der Simulation überein. Vermutlich ist hier noch genügend Mold Compound vorhanden, so dass der Spannungszustand nicht komplett verändert wird. Bestätigt wird diese Vermutung auch durch die Simulation der partiellen Dekapsulierung im nächsten Kapitel 3.6.2. Dort zeigt die Abbildung 141, dass sich die Spannungen an der Chipseite in X-Richtung im Mittel um bis zu 100 MPa ändern können und sich auch in dieser Abbildung die Spannungen von Druck- in Zugspannungen ändern.

Betrachtet man die Spannungsverläufe beider Verfahren miteinander, so sind auch Gemeinsamkeiten zu erkennen. Die Maximalwerte beider Spannungen liegen in der linken und rechten oberen Ecke des Chips. Zusätzlich nimmt die mechanische Spannung von der Chipoberkante zur Chipunterseite sowohl bei der Simulation als auch bei den Raman-Messungen ab.

Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation mit den piezo-resistiven elektrischen Messungen

Nachdem die Raman-Messungen an der Chipseite nach dem mechanischen Schleifen mit der Simulation verglichen wurden, soll nun die piezo-resistive elektrische Messung auf der Chipoberfläche mit den Ergebnissen der Simulation aus Abbildung 136 verglichen werden. Dafür wurden die Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} jeweils nach dem Die Attach (Abbildung 139) und nach dem Wirebond-Prozess (Abbildung 140) dargestellt. Da zu Beginn der Simulation von einem spannungsfreien Chip ausgegangen wurde, wurden in den folgenden beiden Abbildungen nur die Differenzen zwischen der Spannungsmessung des Spannungsmesschips vor und nach dem jeweiligen Prozess betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass die Darstellungen der Ergebnisse aus der piezo-resistiven Messmethode im Vergleich zur Simulation um 90° im Uhrzeigersinn gedreht sind.

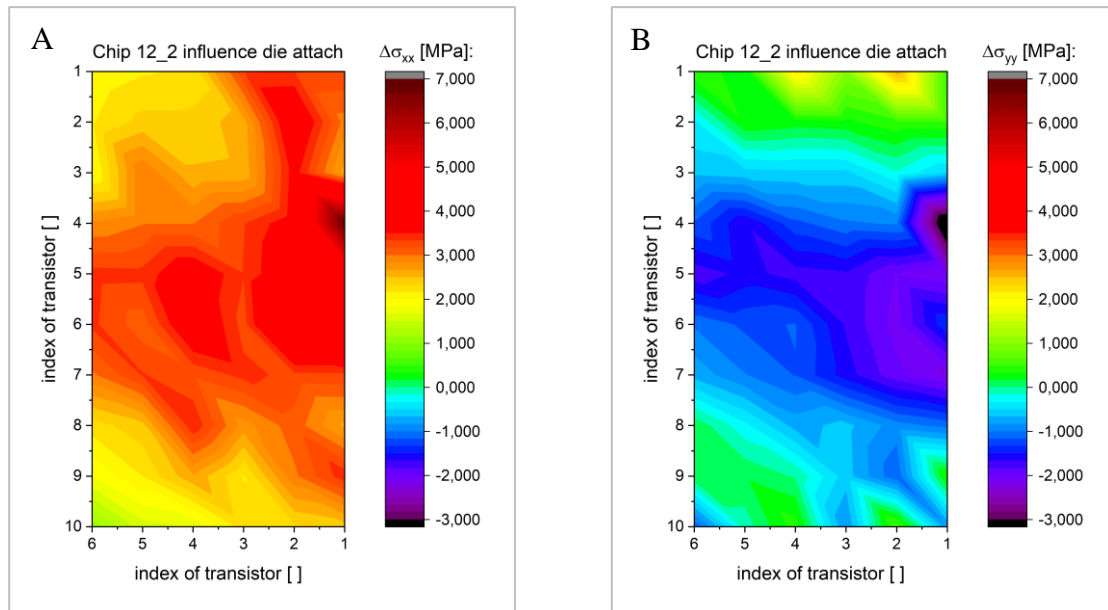


Abbildung 139: Einfluss des Die Attach-Prozesses auf die mechanische Spannung in X-Richtung (A) und in Y-Richtung (B) gemessen mit der piezo-resistiven Methode

Vergleicht man die Differenz der Spannung in X-Richtung aus Abbildung 139 mit der Simulation aus Abbildung 136, dann ist zu erkennen, dass sich die Spannungsverläufe sehr ähneln. Beide Methoden haben das Maximum der Spannung in der Mitte der Chips. Zusätzlich zeigt sowohl die Auswertung der Simulation als auch die Differenz der mechanischen Spannung (Abbildung 139 (A)) dort Zugspannungen. Die mechanische Spannung nimmt sowohl bei der Simulation als auch bei elektrischen Messung nach außen hin parallel zur kurzen Seite des Chips ab. Demnach nimmt auch die Zugspannung in Richtung der kurzen Chipseiten ab. Vergleicht man allerdings die Spannungswerte der Simulation mit den Spannungswerten der piezo-resistiven Messmethode, so fällt auf, dass sie sich sehr unterscheiden. Die Spannungsänderung des Chips im Grundzustand beträgt bei der Simulation 130 MPa, jedoch bei der piezo-resistiven Messung lediglich 5 MPa (rot) bis 7 MPa (dunkelrot).

Auch der Vergleich zwischen der Simulation der Spannung in Y-Richtung und der Ergebnisse der piezo-resistiven Messmethode weisen große Unterschiede auf. Auch hier zeigen beide Verfahren, dass das Maximum der Spannung in der Mitte des Chips liegt. Allerdings nimmt laut Simulation aus Abbildung 136 die Zugspannung parallel zur langen Chipseite ab. Die Abbildung 139 (B) zeigt im Gegensatz dazu Druckspannungen, welche parallel zur kurzen Seite des Chips abnehmen.

Die Differenz zwischen simulierter mechanischer Spannung und experimentell bestimmter mechanischer Spannung nach dem Die Attach beträgt in X-Richtung 123 MPa bis 125 MPa und Y-Richtung 98 MPa bis 99 MPa.

In Abbildung 140 ist der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung gemessen mit der piezo-resistiven elektrischen Methode dargestellt.

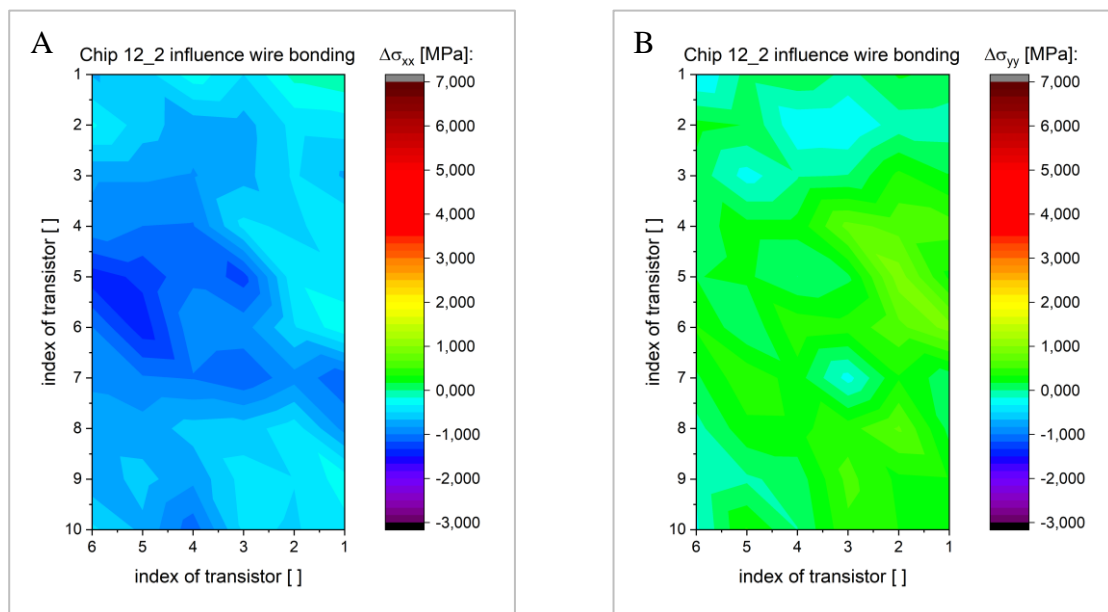


Abbildung 140: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung in X-Richtung (A) und in Y-Richtung (B) gemessen mit der piezo-resistiven Methode

Der Vergleich zwischen der Auswertung der Spannungskomponente σ_{xx} aus der Simulation (Abbildung 136) und der piezo-resistiven Messmethode (Abbildung 140 (A)) zeigt auch hier deutliche Unterschiede. So zeigt die Simulation ähnlich wie nach dem Die Attach Zugspannungen und im Gegensatz dazu die elektrische Messung leichte Druckspannungen mit bis zu -1,5 MPa. Der maximale Spannungswert der Simulation liegt bei 75 MPa. Bei der Auswertung der elektrischen Messung nimmt die Druckspannung parallel zur kurzen Chipseite ab. Ähnlich ist es auch bei der Simulation des Wirebond-Prozesses, nur dass hier die Druckspannung parallel zur kurzen Seite des Chips abnimmt. Vergleicht man die mechanischen Spannungen nach dem Wirebond-Prozess in Y-Richtung aus der Simulation und piezo-resistiven Messung miteinander, so fällt auf, dass die experimentell bestimmte Spannung in Abbildung 140 (B) sehr gering ist. Die mechanische Spannung liegt in der Mitte des Chips zwischen -0,5 MPa (hellblau) und 0,5 MPa (grün). Lediglich an der rechten langen Seite steigt sie auf 1 MPa (gelb). Das Maximum der mechanischen Spannung aus der Simulation liegt bei

70 MPa. Im Vergleich zur Simulation sind bei der elektrischen Messung keine klaren Spannungsverläufe zu erkennen. Bei der Simulation nimmt die Spannung ähnlich wie nach dem Die Attach-Prozess parallel zur langen Seite des Chips ab.

Die Differenz zwischen den maximalen mechanischen Spannungen der Simulation und den piezo-resistiven elektrischen Messungen nach dem Wirebond-Prozess liegen in X-Richtung bei 77 MPa und in Y-Richtung bei 69 MPa. Damit wird der Abstand zwar zwischen den maximalen Spannungswerten beider Methoden im Vergleich zum Die Attach kleiner, es ist aber dennoch nicht möglich, die mechanischen Spannungskomponenten aus der Simulation und der piezo-resistiven Messung miteinander zu vergleichen. Sowohl die Spannungswerte als auch die Spannungsverläufe beider Methoden sind sehr unterschiedlich. Ähnlich wie beim Vergleich der Raman-Messung an den mechanisch geschliffenen Proben (Abbildung 138) mit der Simulation der einzelnen Prozessschritte (Abbildung 137) ist ein möglicher Grund für die Unterschiede der Ergebnisse die Chipmetallisierung, welche bei dem Finite-Element-Modell der Simulation nicht berücksichtigt wird. Darüber hinaus zeigen die elektrischen Messungen, dass der Chip im Grundzustand durch die Chipherstellung inklusive der Metallisierungen bereits Spannungen zwischen -30 MPa und 25 MPa aufweist. Ein weiterer Grund kann die starke Temperaturabhängigkeit der Summenspannung sein, welche als Ergebnis der elektrischen Messung ausgegeben wird. Da diese zur Berechnung der Spannungskomponenten verwendet wird, könnte wiederum diese Temperaturabhängigkeit die Spannungen in X- und Y-Richtung beeinflussen.

Vergleich der simulierten Aufbauschnitte mit der Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven elektrischen Messmethode

In Abbildung 141 (A) ist der Mittelwert der mechanischen Spannung in X- und in Y-Richtung auf der Chipoberfläche zu sehen. Der Mittelwert wurde dabei aus den in Abbildung 141 (B) dargestellten Punkten bestimmt. Aus Abbildung 141 (A) geht deutlich hervor, dass der Mold Compound-Prozess den größten Einfluss auf die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche hat. Die Spannungsdifferenz zwischen der mittleren mechanischen Spannung nach dem Wirebond-Prozess und nach dem Mold-Prozess liegt für die Spannung in X-Richtung bei 97 MPa.

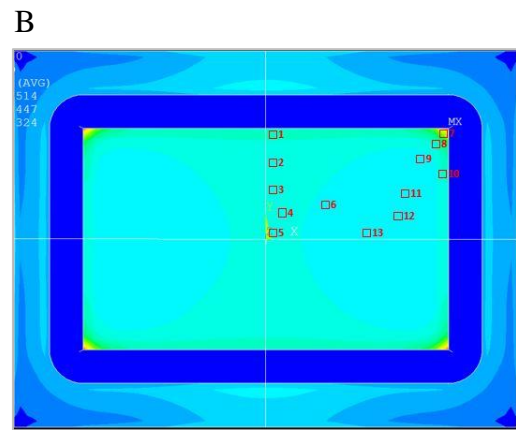
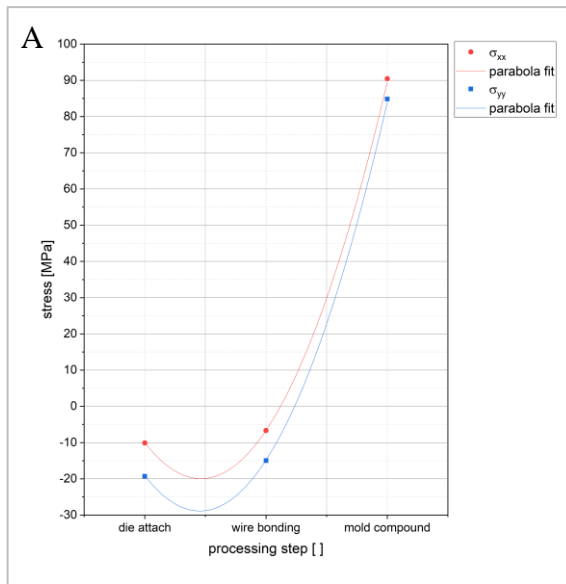


Abbildung 141: Änderung der mittleren mechanischen Spannung berechnet aus den in (B) gezeigten Punkten auf der Chipoberfläche in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte (A);

Die Spannungsänderung durch den Wirebond-Prozess ist sehr gering. Hier liegt die Spannungsdifferenz in X-Richtung bei 3,5 MPa. Im Vergleich zur mittleren mechanischen Spannung nach dem Die Attach wird die Spannung kleiner. Geht man davon aus, dass bei der Simulation der Chip im Grundzustand 0 MPa besitzt, liegt der Einfluss vom Die Attach in X-Richtung bei 10 MPa.

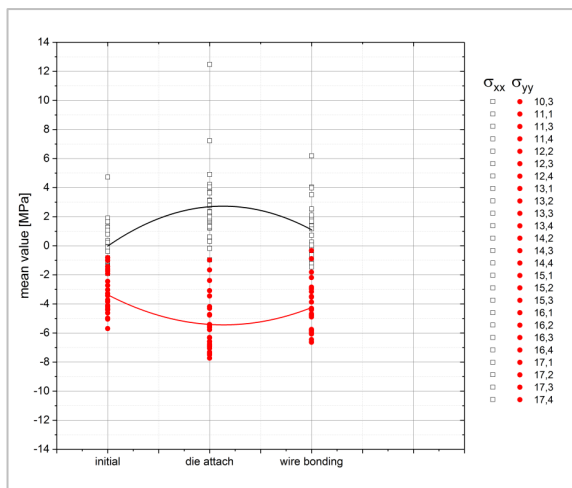


Abbildung 142: Mittelwerte der Spannungsänderung zum jeweils vorherigen Prozessschritt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte

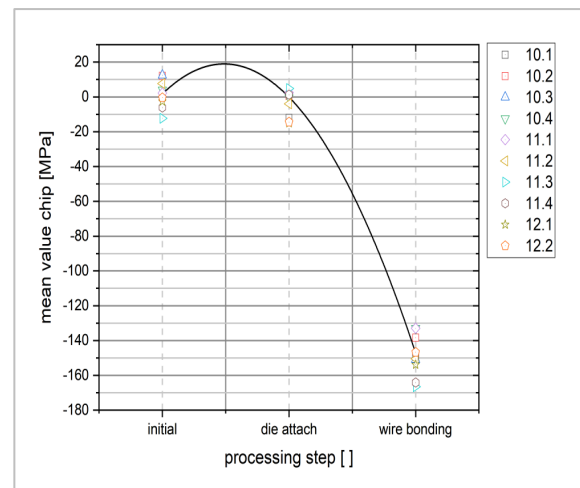


Abbildung 143: Vergleich der Mittelwerte der biaxialen Spannung der einzelnen Chips über die drei Prozessschritte

Der Vergleich des Einflusses der einzelnen Prozessschritte auf die mittlere mechanische Spannung bestimmt mittels Simulation, Raman-Spektroskopie (Abbildung 143) oder mit der piezo-resistiven elektrischen Messung (Abbildung 142) zeigen Ähnlichkeiten im Spannungsverlauf. So liegt die Änderung der mittleren Spannung der Simulation nach dem Die Attach bei -10 MPa in X-Richtung und -20 MPa in Y-Richtung (Abbildung 139 (A)). Im Vergleich dazu liegt die mittlere Spannungsdifferenz der Raman-Messung (Abbildung 138) nach dem Die Attach bei -1,7 MPa und die der piezo-resistiven elektrischen Messung bei 2,7 MPa (Abbildung 140). Nach dem Wirebond-Prozess ändert sich die mittlere Spannung bei der Simulation in X-Richtung und in Y-Richtung um jeweils 5 MPa. Bei den Raman-Messungen ändert sich die mittlere Spannung um -148 MPa und bei der piezo-resistiven Messung um -1,5 MPa. Trotz des ähnlichen Kurvenverlaufs unterscheiden sich die mittleren Spannungswerte der einzelnen Methoden. Der Grund für die Abweichung der mechanischen Spannungswerte aus den Raman-Messungen ist möglicherweise die Betrachtung der biaxialen Spannung bei der Raman-Messung, im Gegensatz zu den einzelnen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} bei der Simulation und der piezo-resistiven elektrischen Methode. Demnach ist es nicht möglich, den Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die gemittelte mechanische Spannung auf der Chipoberfläche aus den drei unterschiedlichen Methoden miteinander zu vergleichen.

3.6.2. Simulation des partiellen Dekapsulierens

Nachdem die Simulation der einzelnen Prozessschritte im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurde, soll nun die Simulation des partiellen Dekapsulierens näher untersucht werden. Dabei wird zunächst das Experiment beschrieben, bei welchem das Mold Compound in 100 μm -Schritten oberhalb des Spannungsmesschips mittels Laser-Dekapsulieren entfernt wurde. Darüber hinaus wurde auch der Versuch simuliert, bei dem das Mold Compound von der Seite in 100 μm -Schritten dekapsuliert wurde. Bei beiden Experimenten wurde sowohl die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche als auch die mechanische Spannung auf die lange Chipseite ausgewertet.

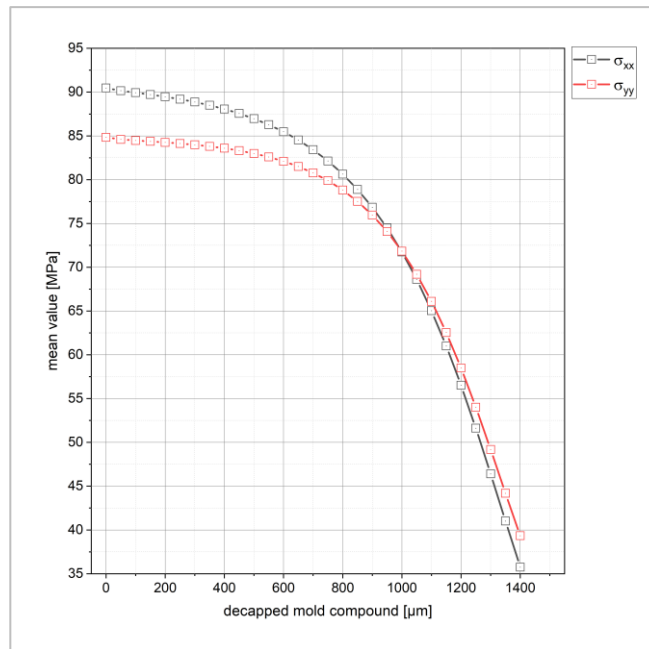


Abbildung 144: Einfluss des partiellen Dekapsulierens von oben auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche

Die Abbildung 144 zeigt den Einfluss des Entfernens des Mold Compounds auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche. Sowohl die Spannung in X-Richtung als auch die Spannung in Y-Richtung nimmt exponentiell ab. Die mechanische Spannung in X-Richtung sinkt dabei von 90 MPa auf 36 MPa und in Y-Richtung von 84 MPa auf 39 MPa. Damit ist die Differenz der Spannung auf der Chipoberfläche zwischen dem ersten und dem letzten Dekapsulierschritt in X-Richtung mit 54 MPa größer als die Differenz in Y-Richtung mit 45 MPa.

Der damit einhergehende flachere Abfall der mechanischen Spannung in Y-Richtung ist auch in Abbildung 145 zu erkennen. Demnach hat das partielle Dekapsulieren einen geringeren Einfluss auf die mechanische Spannung in Y-Richtung als auf die Spannung in X-Richtung.

Dies wird auch durch die Experimente in Kapitel 3.5.3. bestätigt. Darin wurde der Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung mit der piezo-resistiven Messmethode bestimmt. Bei der Auswertung zeigte sich, dass sich die Spannung beim Dekapsulieren in Y-Richtung nicht so stark ändert wie die Spannung in X-Richtung.

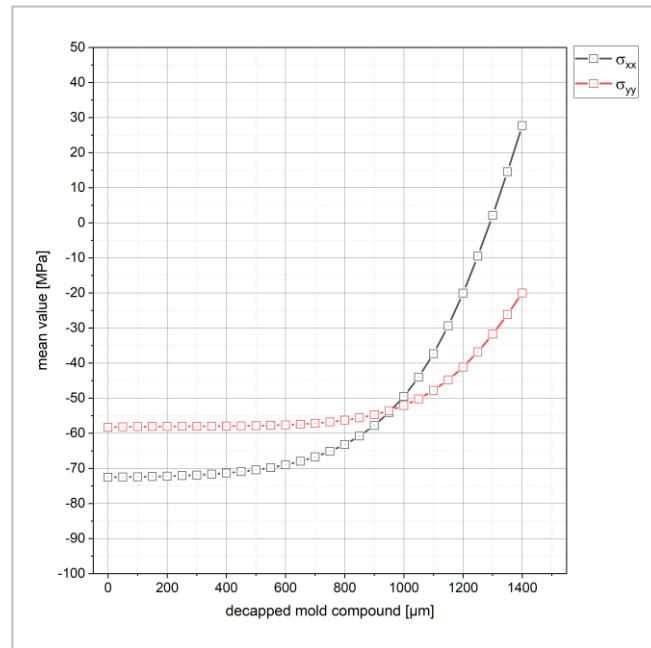


Abbildung 145: Einfluss des partiellen Dekapsulierens von oben auf die mechanische Spannung an der langen Chipseite

Zusätzlich bestätigt die Simulation die Beobachtung aus Kapitel 3.5.3. „Partielle Dekapsulierung“, dass die mechanische Spannung ab einem gewissen Volumen an entferntem Mold Compound stärker abnimmt. So liegt die Spannungsdifferenz nach den ersten 800 µm bis 1000 µm entfernten Mold Compound in X-Richtung bei 10 MPa und in Y-Richtung bei 5 MPa. Im Vergleich dazu lag die Spannungsdifferenz bei der Auswertung der Spannungsmessung während des schichtweise Abtragens von Mold Compound mit der piezo-resistiven Messmethode in X-Richtung bei 9 MPa und in Y-Richtung bei 3 MPa. Demnach liegen die experimentell bestimmten Spannungsdifferenzen nahe an den simulierten Spannungsdifferenzen für das partielle Dekapsulieren von Mold Compound oberhalb des Chips. Das Entfernen der letzten 400 µm Mold Compound konnte experimentell nicht mehr überprüft werden, da die Pins mit Epoxidharz fixiert werden mussten, um nicht abzureißen. Dadurch wurde allerdings die mechanische Spannung auf dem Chip verändert (Kapitel 3.5.3). Aus der Simulation geht hervor, dass sich die Spannung beim Entfernen der letzten 400µm Mold Compound in X-Richtung um 35 MPa und in Y-Richtung um 30 MPa ändert. Damit nimmt die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche drei- bis fünfmal so stark ab, als beim Dekapsulieren der ersten 800 µm bis 1000 µm.

Die Abbildung 145 zeigt den Einfluss des Dekapsulierens vom Mold Compound oberhalb des Spannungsmesschips auf die Spannung an der Chipseite. Es geht deutlich hervor, dass sich die

mittlere mechanische Spannung mit zunehmend entfernten Mold Compound ändert. Die Spannungsänderung in Y-Richtung ist auch hier über den gesamten Dekapsulier-Prozess kleiner als die Spannungsänderung in X-Richtung. Die mittlere Spannung in X-Richtung ändert sich um über 100 MPa und die Spannung in Y-Richtung bis zu 80 MPa. Dabei ändert sich die Spannungsrichtung während des Dekapsulierens in X-Richtung von Druck- in Zugspannung. Ähnlich wie auf der Chipoberfläche nimmt die mittlere mechanische Spannung zunächst sehr schwach und nahezu linear ab. In X-Richtung ändert sich der lineare Abfall der Spannung nach dem Entfernen einer ungefähr 600 μm dicken Mold Compound-Schicht und in Y-Richtung nach einer ungefähr 800 μm dicken Schicht. Nimmt die dekapsulierte Schichtdicke weiter zu, so nimmt die mittlere Spannungsänderung exponentiell zu. Die Spannungsänderung liegt in X-Richtung bis 600 μm bei 3 MPa und zwischen 600 μm und 1400 μm bei fast 100 MPa. In Y-Richtung liegt die Spannungsänderung bis 800 μm ähnlich wie in X-Richtung bei 3 MPa und zwischen 1000 μm und 1400 μm bei 30 MPa. Damit ändert sich die mechanische Spannung in X-Richtung während des Entfernen von den letzten 800 μm Mold Compound 33 Mal stärker als in den ersten 600 μm . In Y-Richtung ändert sich die Spannungsdifferenz beim Entfernen der letzten 600 μm Mold Compound im Vergleich zum Dekapsulieren der ersten 800 μm 10 Mal stärker.

Zusammenfassend zeigen beide Auswertungen der Abbildungen 144 und 145, dass es möglich ist, ein gewisses Volumen von Mold Compound zu entfernen, ohne dass sich dabei die mittlere mechanische Spannung stark verändert. Die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche verändert sich nach dem Dekapsulieren von 600 μm Mold Compound lediglich um 5 MPa in X-Richtung und 2 MPa in Y-Richtung.

Vergleicht man den Einfluss des Dekapsulierens von Mold Compound über der Chipoberfläche bestimmt durch die Simulation und die piezo-resistive elektrischer Messung, wie in Abbildung 146, dann ist zu erkennen, dass die mittlere mechanische Spannung in X-Richtung beider Methoden bis zu einer dekapsulierten Mold Compound-Dicke von 600 μm sehr gut übereinstimmen. Um beide Methoden noch besser miteinander vergleichen zu können, wurde in Abbildung 146 die Differenz der Spannungswerte zwischen zwei Dekapsulierschritten dargestellt. Danach wird der Anstieg der simulierten mittleren mechanischen Spannungsänderung deutlich größer als die experimentell bestimmte Spannungsänderung. Bei der Spannung in Y-Richtung sind die experimentell bestimmten Spannungswerte im Vergleich zu den simulierten Spannungswerten deutlich geringer. Zudem nimmt die simulierte

Spannungsdifferenz im Gegensatz zur Spannungsdifferenz bestimmt mit Hilfe der piezo-resistiven Messmethode deutlich stärker zu.

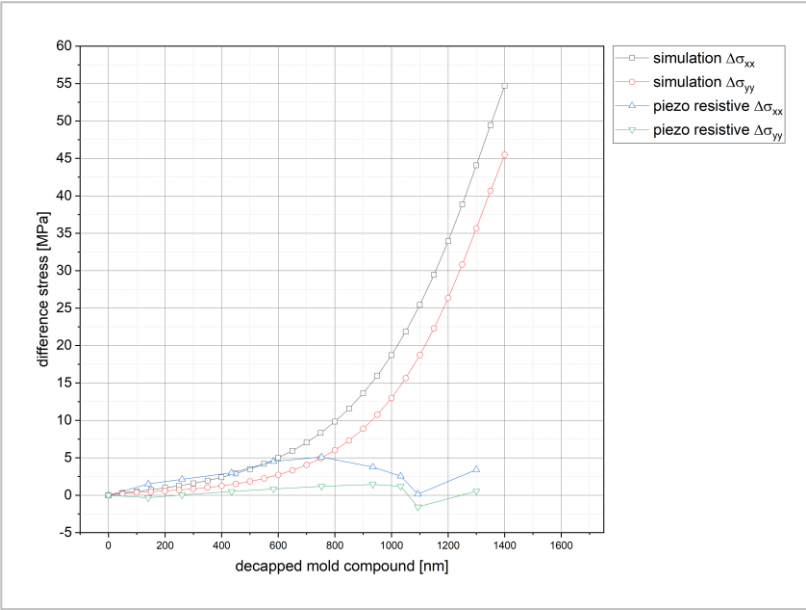


Abbildung 146: Vergleich der Spannungsdifferenzen zwischen Simulation und piezo-resistiver Messung nach jedem Dekapsulierschritt von oben auf die Chipoberfläche

3.7. Ergebnisse zusätzlicher Analysen

Während des Aufbaus der Spannungsmesschips wurde die intrinsische mechanische Spannung auf diesen Chips prozessbegleitend zum einen mit dem Raman-Spektrometer und zum anderen über den piezo-resistiven Koeffizienten mittels elektrischer Messung gemessen. Zusätzlich wurde die Biegung der einzelnen Chips vor dem Prozessieren und nach jedem einzelnen Prozessschritt bis zum Wirebond-Prozess bestimmt. Dazu wurde die Oberfläche jedes einzelnen Chips mittels Weißlichtinterferometer gemessen. Um anschließend die einzelnen Spannungsmesschips besser miteinander vergleichen zu können, wurde aus diesem Oberflächenprofil ein Höhenprofil jeweils in X-Richtung (horizontal) und in Y-Richtung (vertikal) extrahiert. Diese Höhenprofile wurden, wie aus den folgenden Abbildungen 147 und 148 hervorgeht, mittig über das Oberflächenprofil gelegt.

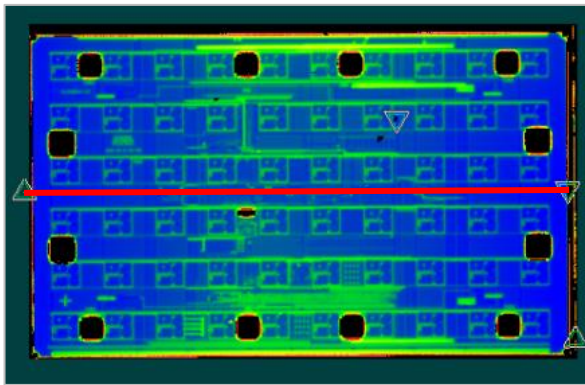


Abbildung 147: Oberflächenprofil eines Spannungsmesschips gemessen mittels Weißlichtinterferometrie und die Position der horizontalen Linie für das Höhenprofil

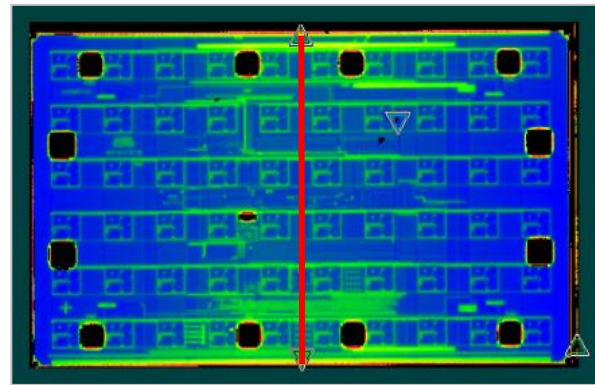


Abbildung 148: Oberflächenprofil eines Spannungsmesschips gemessen mittels Weißlichtinterferometrie und die Position der vertikalen Linie für das Höhenprofil

In diese Höhenprofile wurde jeweils ein Kurven-Fit in Form einer Parabel gezeichnet, dabei wurden die Metallisierungen auf den Chips nicht berücksichtigt (Abbildung 149), da diese den Kurven-Fit beeinflussen und verfälschen würden. Aus dem Kurven-Fit wiederum wurde die Biegung jedes Chips aus der Differenz des Maximums und des Minimums berechnet.

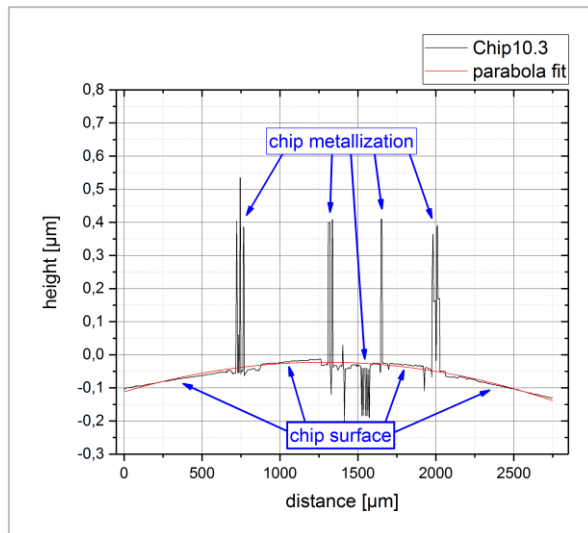


Abbildung 149: Beispiel für einen Parabel-Kurven-Fit (rot) ohne Berücksichtigung der Chipmetallisierung

Die Ergebnisse aus der Bestimmung der Biegung des Spannungsmesschips vor dem Prozessieren und nach jedem einzelnen Prozessschritt sind in den nachfolgenden Abbildungen 150 und 151 zu sehen. Dabei sind die Chips 1-10, auf denen die Passivierung für die Raman-Messungen mittels Plasmaätzen entfernt wurden (Kapitel 3.5.1), schwarz markiert und die restlichen Chips, auf denen die Passivierung noch vorhanden ist sind rot markiert.

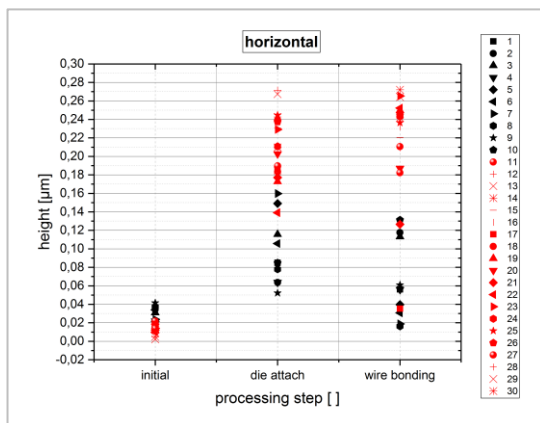


Abbildung 150: Biegung in horizontaler Richtung (X-Richtung) jedes einzelnen Spannungsmesschips nach dem entsprechenden Prozessschritt

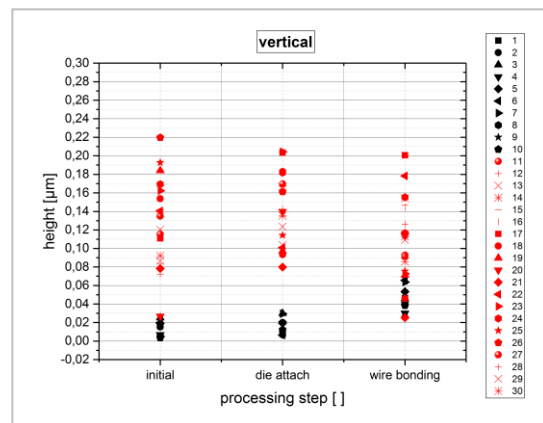


Abbildung 151: Biegung in vertikaler Richtung (Y-Richtung) jedes einzelnen Spannungsmesschips nach dem entsprechenden Prozessschritt

In Abbildung 150 ist zu erkennen, dass die Schwankung der Spannungsmesschips, auf denen das Imid noch vorhanden ist, viel größer ist als die Schwankung der Spannungsmesschips ohne Passivierung.

Die Verbiegungen liegen im Grundzustand noch sehr eng beieinander. Der Abstand der entferntesten Punkte beträgt $0,04\ \mu\text{m}$. Nach dem Die Attach entfernen sich die Punkte immer mehr und der Abstand beträgt $0,22\ \mu\text{m}$. Noch weiter nimmt die Entfernung der Punkte mit $0,25\ \mu\text{m}$ nach dem Wirebond-Prozess zu. Die maximale Biegung der Chips ohne Passivierung nimmt nach dem Die Attach im Mittel um $0,7\ \mu\text{m}$ zu. Nach dem Wirebond-Prozess reduziert sich die mittlere Biegung dieser Chips um $0,3\ \mu\text{m}$.

Die Verbiegung in horizontaler Richtung der Chips mit Passivierung (rot) ändert sich im Mittel deutlich stärker nach den einzelnen Prozessen als bei den Chips ohne Passivierung. So liegt die Änderung der Verbiegung nach dem Die Attach bei $0,18\ \mu\text{m}$ und nach dem Wirebond-Prozess bei $-0,02\ \mu\text{m}$ (Abbildung 150).

Die Abbildung 151 zeigt, dass sich die Biegung in vertikaler (Y-Richtung) über die einzelnen Prozessschritte kaum ändert. Die Biegung der Chips mit Passivierung (rot) scheint im Mittel leicht kleiner zu werden. In vertikaler Richtung ist die Änderung der Biegung der Chips ohne Passivierung (schwarz) von dem Grundzustand zum Die Attach mit $0,01\ \mu\text{m}$ sehr gering. Auch nach dem Wirebond-Prozess ändert sich die Biegung dieser Chips im Vergleich zur Änderung der Verbiegung in horizontaler Richtung mit $0,03\ \mu\text{m}$ nur sehr wenig. Vergleicht man die roten Datensätze beziehungsweise die schwarzen Datensätze über die Prozessschritte miteinander, dann ist die Streuung der Datensätze der jeweiligen Farbe bei allen drei Prozessen gleich groß. Wobei die Streuung der Biegung der Spannungsmesschips mit Imid, ähnlich wie bei Auswertung der Biegung in horizontaler Richtung, deutlich größer ist, als die Biegung der Spannungsmesschips ohne Imid.

Der Grund für die Änderung der gemessenen Verbiegung in horizontaler und vertikaler Richtung der Chips nach dem Wirebond-Prozess ist auch hier das Erreichen der Glasübergangstemperatur T_G des Die Attach während des Wirebonding-Prozesses. Dadurch sinkt, wie bereits in Kapitel 3.3.2. beschrieben, die Steifigkeit des Klebers auf 5 %. Beim Abkühlen nimmt die Steifigkeit wieder zu und die Spannung beziehungsweise Biegung ändert sich.

Aus den beiden Abbildungen 150 und 151 wird also deutlich, dass die Verbiegungen der Chips mit Imid deutlich größer sind, als die der Chips ohne Passivierung. Dabei liegen die Verbiegungen der Spannungsmesschips ohne Passivierung nach dem Die Attach und dem Wirebonding zum größten Teil unter den Verbiegungen der Chips mit Passivierung.

Der Grund für den Unterschied der gemessenen Verbiegung auf den Chips mit und ohne Imid könnte das Imid selbst sein. So ist es denkbar, dass bei den rot markierten Verbiegungen in Abbildung 150 und 151 die Oberfläche des Imids gemessen wurde und nicht die des Chips. Zusätzlich fällt bei den Weißlichtinterferometer-Messungen auf den Spannungsmesschips mit Imid auf, dass die Enden des Höhenprofils immer stark nach oben gebogen sind (dunkelblauer Kreis in Abbildung 153 und Abbildung 155). Das ist untypisch für eine Chipoberfläche und ist ein weiteres Indiz dafür, dass bei diesen Messungen eher die Oberfläche des Imids gemessen wurde.

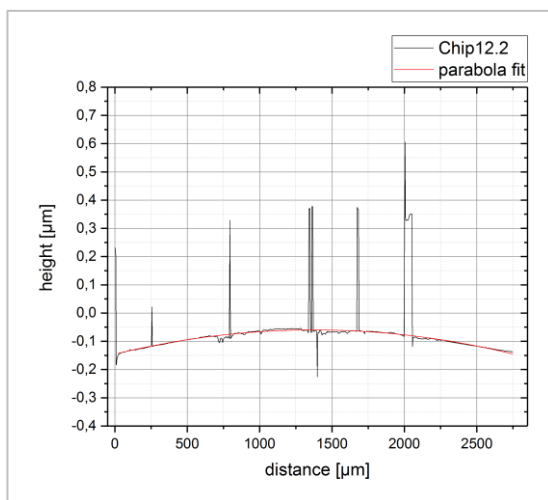


Abbildung 152: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach

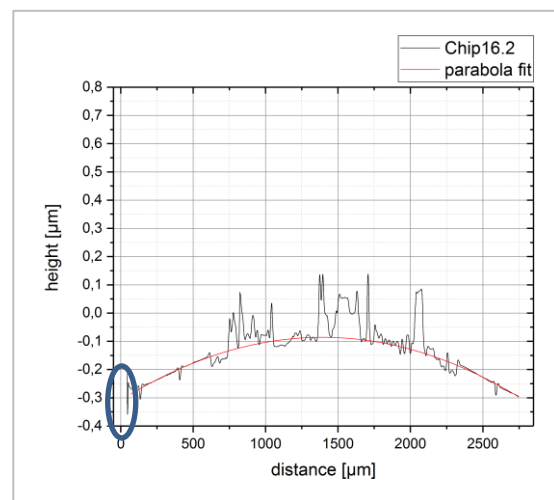


Abbildung 153: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 16.2 nach dem Die Attach

Vergleicht man die gemessenen Höhenprofile der Spannungsmesschips mit und ohne Passivierung, so fällt auf, dass die Chips ohne Passivierung ein Höhenprofil besitzen, welches der Abbildung 152 ähnelt. Die Höhenprofile der Chips mit Imid haben eher Ähnlichkeit mit dem Höhenprofil aus Abbildung 153.

Um diese Hypothese zu bestätigen, wurden auf zehn Chips mit Passivierung, welche bereits mittels Weißlichtinterferometer charakterisiert wurden, die Passivierungen unter Verwendung des Plasmaätzverfahrens entfernt. Danach wurde die Verbiegung dieser Chips auf der Oberfläche erneut gemessen.

Der Vergleich der Weißlichtinterferometer-Messungen auf den zehn Chips vor und nach dem Entfernen der Passivierung ist in Abbildung 154 abgebildet. Die linke Abbildung 154 (A) zeigt deutlich, dass der Einfluss des Entfernen des Imids auf die gemessene maximale Verbiegung

in horizontaler Richtung nicht so groß ist. Die Differenz zwischen den Messungen vor und nach dem Entfernen des Imids liegt im Mittel bei $0,001 \mu\text{m}$.

Wie aus Abbildung 154 (B) hervorgeht, hat das Entfernen des Imids einen starken Einfluss auf die vertikal gemessene Chipbiegung. Ohne Imid wird die gemessene Verbiegung deutlich kleiner. Die mittlere Differenz liegt bei $0,12 \mu\text{m}$. Das bedeutet aber auch, dass das Imid in Y-Richtung deutlich stärkere Höhenunterschiede zwischen der Mitte und dem Rand aufweist als in X-Richtung.

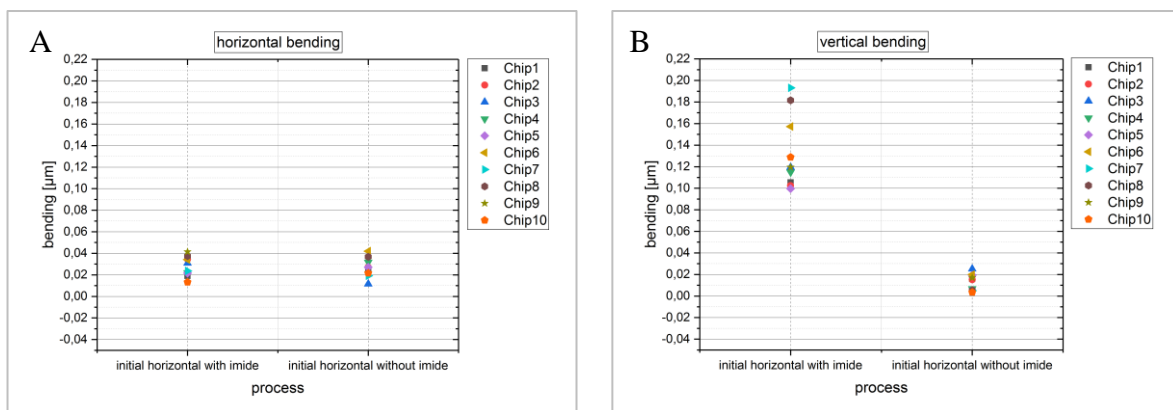


Abbildung 154: Vergleich der Verbiegung vor und nach der Imid-Entfernung in horizontaler (A) und vertikaler (B) Richtung

Der unterschiedliche Einfluss vom Entfernen der Passivierung wird auch in der folgenden Abbildung 155 deutlich. Hier sind die Verbiegungen vor und nach dem Entfernen des Imids am Beispiel eines Spannungsmesschips dargestellt.

Vergleicht man die Abbildungen 155 (A) und (B) miteinander, so wird ersichtlich, dass durch das Entfernen des Imids die Verbiegung des Chips deutlicher geworden ist und somit die maximale Verbiegung mit Hilfe eines Parabel-Fits genauer bestimmt werden kann. Durch das Entfernen des Imids können die Chipmetallisierungen deutlicher von der Chipoberfläche unterschieden werden, da diese nun deutlich höher liegen, wie im Vergleich der Abbildung 155 (A) mit (B) beziehungsweise (C) mit (D) zu sehen ist.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass es bei Chips mit Passivierung nicht möglich ist, die Verbiegung der Chipoberfläche zu bestimmen, da hier lediglich die Oberfläche des Imids gemessen wird. Das bedeutet für die Abbildung 150 und Abbildung 151, dass lediglich die schwarzen Messpunkte die Verbiegungen der Chipoberfläche zeigen. Betrachtet man nun

lediglich diese schwarzen Messpunkte, so zeigt sich, dass der Die Attach die Biegung des Chips in horizontaler Richtung stärker beeinflusst als in vertikaler Richtung. Beim Wirebond-Prozess wird hingegen die Biegung in vertikaler Richtung stärker beeinflusst (Abbildung 150 und Abbildung 151). Vermutlich zieht sich der Die Attach in horizontaler Richtung stärker zusammen, was eine stärkere Biegung zur Folge hat.

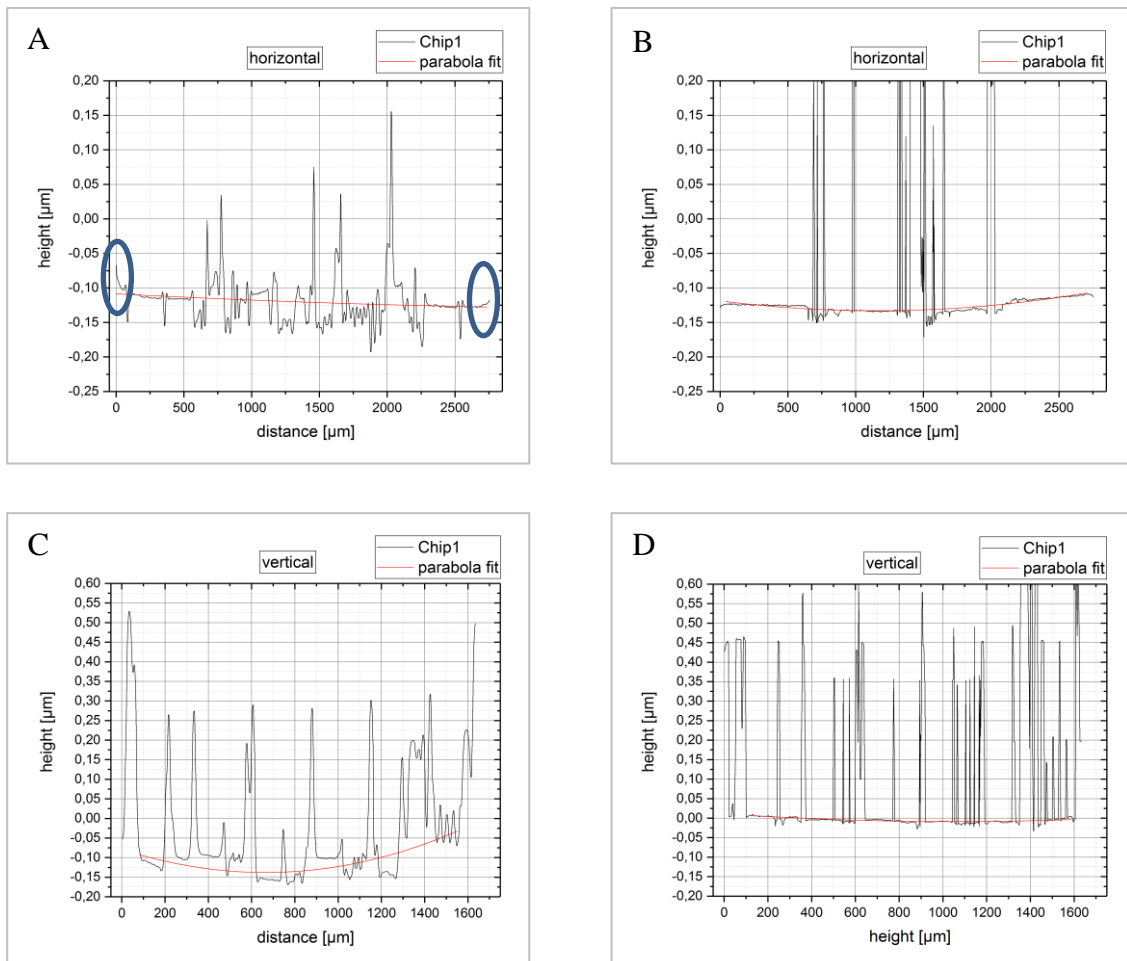


Abbildung 155: Einfluss der Imid-Entfernung auf die Verbiegungsmessung mittels Weißlichtinterferometer am Beispiel eines Spannungsmesschips; (A), (C) Biegung vor dem Entfernen des Imids in horizontaler Richtung; (B), (D) Biegung nach dem Entfernen des Imids in horizontaler Richtung

Vergleicht man nun die mittels Weißlichtinterferometer gemessenen Biegungen mit den Ergebnissen aus den piezo-resistiven elektrischen Messungen wird deutlich, dass diese sehr gut übereinstimmen. Es muss lediglich beachtet werden, dass aufgrund der Messausrichtung beim Weißlichtinterferometer der Chip um neunzig Grad gedreht ist.

Zum Vergleich mit den piezo-resistiven Messungen werden die Höhenprofile des Chips 12_2 in vertikaler und in horizontaler Richtung jeweils nach dem Die Attach (Abbildung 156 und

Abbildung 157) und nach dem Wire Bond-Prozess (Abbildung 160 und Abbildung 161) betrachtet.

Die Verbiegung des Chips 16_2 konnte nicht für den Vergleich verwendet werden, da auf diesem das Imid nicht entfernt wurde und die Passivierung, wie bereits gezeigt, einen starken Einfluss auf die Weißlichtinterferometer-Messungen hat.

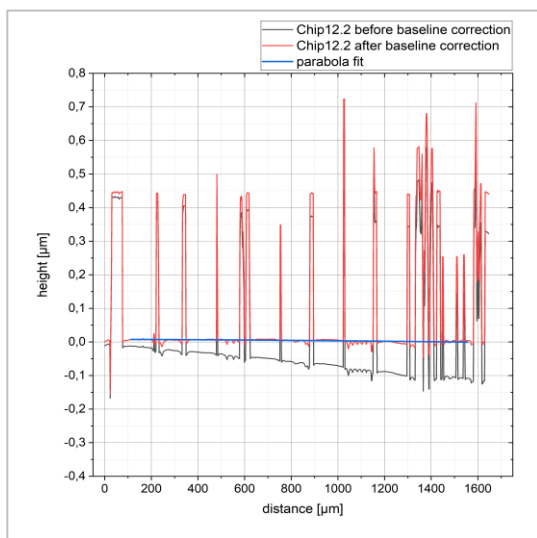


Abbildung 156: Vertikales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach

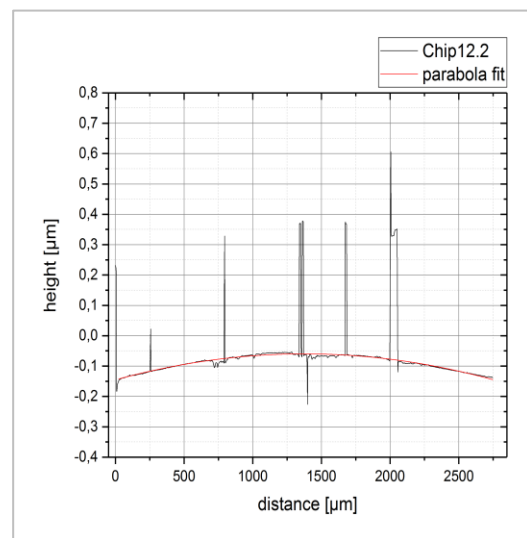


Abbildung 157: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach

Die Abbildung 156 zeigt die vertikale Verbiegung des Spannungsmesschip 12_2. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verkippung des Chips (grauer Graph) deutlich größer ist, als die Verbiegung dieses Chips. Nach der Korrektur der Verkippung liegt die Verbiegung des Chips bei nur $0,01 \mu\text{m}$ (roter Graph). Die Verbiegung in horizontaler Richtung ist um einiges größer. Hier liegt der Wert bei $0,08 \mu\text{m}$. Auch hier zeigt sich wie in Abbildung 150 und Abbildung 151, dass der Die Attach-Prozess die Verbiegung in X-Richtung stärker beeinflusst.

Die nachfolgenden Abbildungen 158 und 159 zeigen die entsprechenden piezo-resistiven Messungen des Spannungsmesschips 12_2. Betrachtet man nun die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche des Chips 12_2 aus Abbildung 158, dann erkennt man, dass sich die Spannung am stärksten in der Mitte des Chips ändert. Wie auch die Abbildung 157 bestätigt, ändert sich hier die Verbiegung am stärksten und wie bereits in Kapitel 3.5.2. beschrieben nimmt die Druckspannung in der Mitte des Chips ab. Das ist vor allem an dem kleiner werdenden Flächenanteil von gelben und grünen Bereichen in der Mitte des Spannungsmesschips 12_2 zu erkennen und bedeutet gleichzeitig, dass der Chip in diesen

Bereichen durch den Die Attach Zugspannung erfährt. Diese Vermutung stimmt auch mit der gemessenen konvexen Biegung des Chips in Abbildung 157 überein.

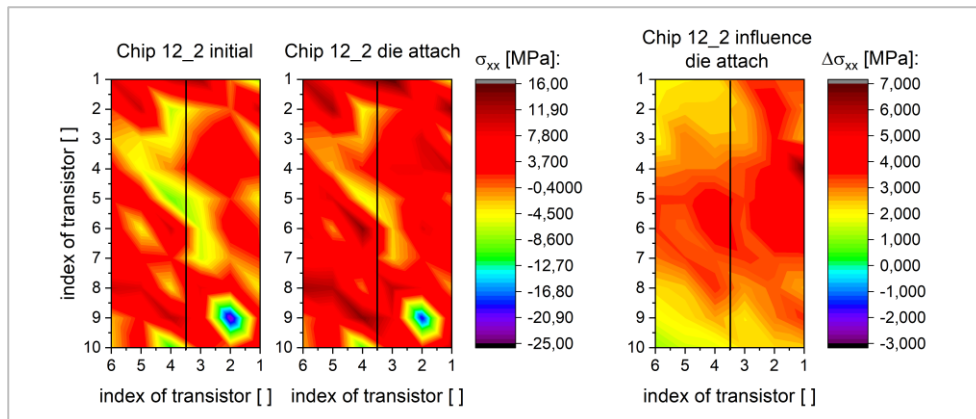


Abbildung 158: Mechanische Spannung in X-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Die Attach; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 144, an der das Höhenprofil gemessen wurde

Schaut man sich nun die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche in Y-Richtung an der Position an (schwarze Linie in Abbildung 159), an der auch das Höhenprofil aus Abbildung 156 gemessen wurde, so erkennt man, dass sich die Spannung hier nur sehr geringfügig ändert. Deutlich wird das, wenn man die beiden linken Bilder in Abbildungen 159 miteinander vergleicht. Die Differenz zwischen der mechanischen Spannung auf dem Chip im Grundzustand und nach dem Die Attach liegt zwischen -1 MPa und -2 MPa (rechtes Bild in Abbildung 159). Folglich müsste die Biegung des Chips in diesem Bereich sehr klein sein, was durch die Abbildung 156 bestätigt wird.

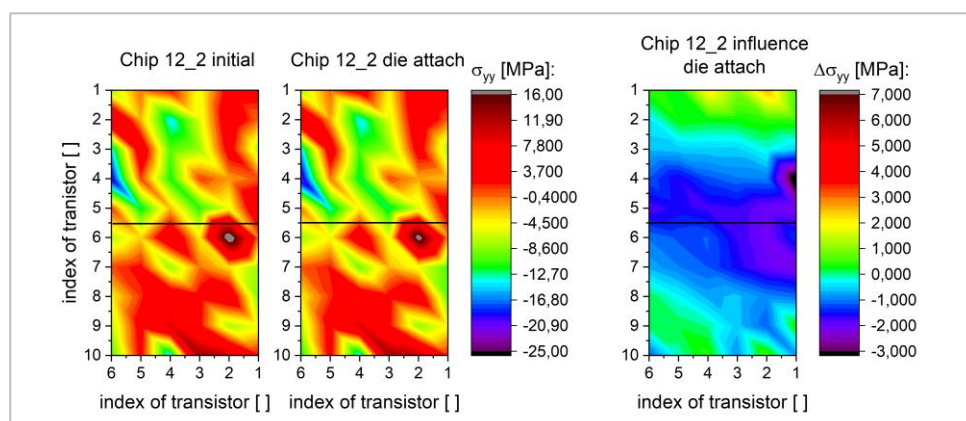


Abbildung 159: Mechanische Spannung in Y-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Die Attach; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 145, an der das Höhenprofil gemessen wurde

Nachdem die Vergleichbarkeit der Messung von mechanischer Spannung und Verbiegung nach dem Die Attach-Prozess bestätigt wurde, soll nun der Vergleich der Ergebnisse beider Methoden vom Spannungsmesschip 12_2 nach dem Wirebond-Prozess untersucht werden.

Die Abbildungen 160 und 161 zeigen die Höhenprofile aus den Weißlichtinterferometer-Messungen.

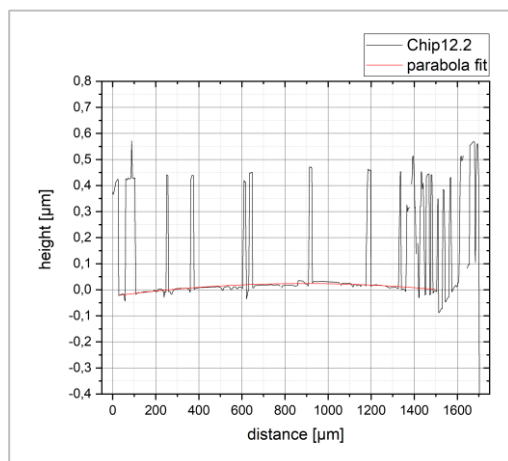


Abbildung 160: Vertikales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Wirebond-Prozess

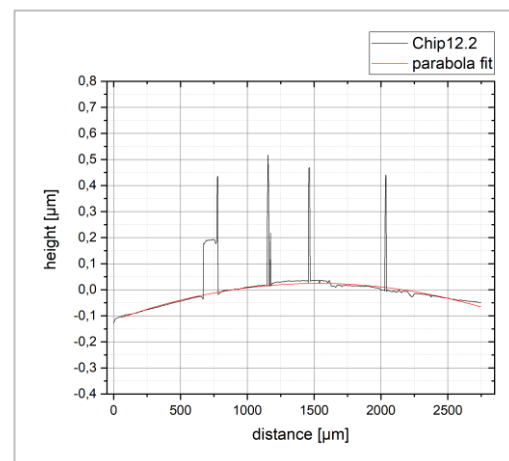


Abbildung 161: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Wirebond-Prozess

Im Vergleich zum Die Attach erkennt man in Abbildung 149, dass die vertikale Biegung durch den Wirebond-Prozess um einiges größer ist. Die maximale Biegung liegt bei 0,4 MPa und ist damit vier Mal so hoch wie nach dem Die Attach. Auch die Verbiegung in horizontaler Richtung ist nach dem Wirebonding größer geworden. Hier liegt die maximale Biegung bei 0,12 µm. Das bedeutet, dass die Biegung nach dem Wirebond-Prozess in vertikaler Richtung um 0,03 µm und in horizontaler Richtung um 0,4 µm angestiegen ist. Demnach ist die Änderung der Verbiegung nach dem Wirebonding in horizontaler Richtung und damit auch der Einfluss des Prozesses auf die Verbiegung größer als die Änderung der Biegung nach dem Die Attach. In vertikaler Richtung ist der Einfluss auf die Biegung des Spannungsmesschips vom Wirebond-Prozess kleiner als der vom Die Attach-Prozess.

Die Abbildung 162 zeigt die mechanische Spannung in X-Richtung gemessen mittels piezoresistiver Messmethode nach dem Wirebond-Prozess. Im Vergleich zu der Spannungsänderung nach dem Die Attach sind die Änderungen der mechanischen Spannung nach dem Wirebond-Prozess deutlich geringer. Die Werte liegen im Bereich von 0 MPa und -1,4 MPa (rechtes Bild in Abbildung 162). Das bestätigt auch die Schlussfolgerung aus Abbildung 161, in der die

Änderung der Biegung nach dem Wirebonding im Vergleich zum Die Attach deutlich geringer ist.

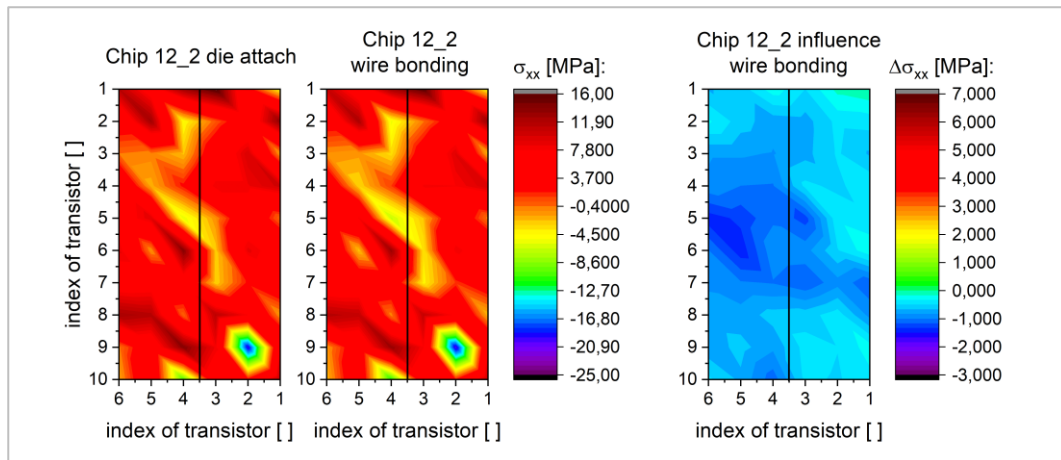


Abbildung 162: Mechanische Spannung in X-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Wirebonding; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 144, an der das Höhenprofil gemessen wurde

In Abbildung 163 ist der Einfluss des Wirebond Prozesses auf die mechanische Spannung in Y-Richtung an der Chipoberfläche gezeigt. Ähnlich wie bei der Spannung in X-Richtung sind hier die Spannungsänderungen sehr klein. Die Änderungen der mechanischen Spannung liegen zwischen -0,3 MPa (hellblau) und 1 MPa (gelb) (rechtes Bild in Abbildung 163). Damit sind die Spannungsänderung in Y-Richtung nach dem Wirebonding im Vergleich zur Änderung der Spannung nach dem Die Attach nicht einmal halb so groß.

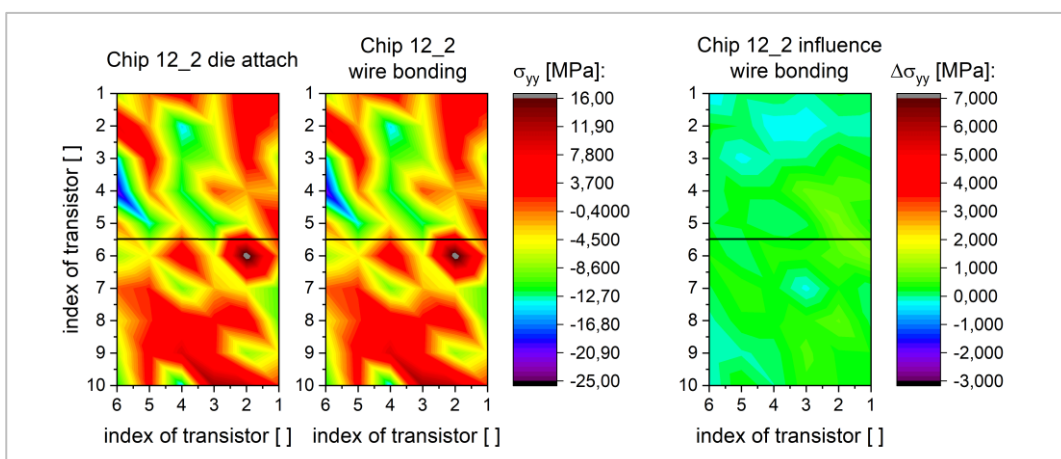


Abbildung 163: mechanische Spannung in Y-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Wirebonding; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 145 an der das Höhenprofil gemessen wurde

Diese geringe Änderung der mechanischen Spannung aus Abbildung 163 spiegelt sich auch in der bereits angesprochenen geringen Änderung der Biegung aus Abbildung 160 wider. Mit einer Biegungsänderung von $0,03 \mu\text{m}$ ist die resultierende Biegung immer noch sehr viel kleiner als die Biegung in horizontaler Richtung. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der piezo-resistiver Messung mit den Ergebnissen aus den Messungen der Verbiegung mittels Weißlichtinterferometer zeigt, dass sich beide Verfahren gegenseitig bestätigen und ergänzen. So ist es zum Beispiel möglich, durch die Höhenprofile und der darin dargestellten Verbiegungen der Chipoberfläche die Änderung der mechanischen Spannung nach dem jeweiligen Prozessschritt besser zu verstehen. Darüber hinaus geht aus beiden Verfahren hervor, dass der Wirebond-Prozess einen kleineren Einfluss auf die Chipoberfläche hat, als der Die Attach-Prozess.

3.8. Zusammenfassung der Ergebnisse

3.8.1. Untersuchung der Messsysteme

Nachdem im Kapitel 3. „Experimentelle Untersuchungen“ zunächst die verwendeten Messmethoden bezüglich ihrer Stabilität und ihrer Grenzen charakterisiert wurden, kann nun zusammenfassend ein Blick auf die einzelnen Experimente geworfen werden. Die Untersuchung der einzelnen Messmethoden war notwendig, um Aussagen über die Zuverlässigkeit zu treffen, mit der die einzelnen Methoden die mechanische Spannung bestimmen.

So wurde im Kapitel 3.2. „Stabilität und Zuverlässigkeit des Raman-Spektrometers“ unter anderem die Informationstiefe im Silizium mit dem verwendeten Nd:Yag-Laser und der Wellenlänge 532 nm mit 1 μm bestimmt (Kapitel 3.2.1. „Informationstiefe im Silizium“). Dieser Wert stimmt mit dem Literaturwert der Informationstiefe für Silizium und dem verwendeten Laser überein. Für die Spannungsmessung gilt demnach, dass die gemessene Peak-Verschiebung immer der Information aus dem gesamten angeregten Volumen entspricht. Das Anregungsvolumen setzt sich aus der Informationstiefe von 1 μm und dem Strahldurchmesser von 2,3 μm bei Verwendung des x100 VIS-Objektivs zusammen. Aus der Variation der verschiedenen Messparameter ist zu erkennen, dass sowohl die Laserleistung als auch die Messzeit einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Raman-Messungen haben (Kapitel 3.2.3. „Einfluss verschiedenster Messparameter auf die Messung“). Die Langzeitmessungen zeigen, dass das Raman-Spektrometer auch über längere Messungen hinweg von beispielsweise 24 Stunden stabil ist (Kapitel 3.2.2. „Stabilität des Lasers und der Referenzquelle“). Resultierend aus diesen Messungen wurden zum einen die Parameter für die Messung der Peak-Verschiebung, aus der die mechanische Spannung bestimmt wird, festgelegt und zum anderen Überprüfungsintervalle definiert. Bei der Überprüfung werden gewisse Größen, wie beispielsweise der Abstand zwischen dem Neon- und dem Siliziumpeak oder die Intensität des Siliziumpeaks überprüft (Kapitel 3.2.4. „Wahl der Messparameter“). Die Auswertungen aus Abbildung 31 zeigen, dass der Einfluss des Lasers auf die mechanische Spannung im zu messenden Siliziumchip bei einer Messzeit von 2×10 s am geringsten ist. Gleichzeitig kann bei dieser Messzeit ein guter Kompromiss zwischen Dauer einer Messung und Stabilität des Lasers über den Zeitraum einer Messung gefunden werden. Die Laserleistung für die Spannungsmessungen mit dem Raman-Spektrometer wurde auf 25 % reduziert (Abbildung 28), da hier der Einfluss auf die mechanische Spannung und die Standardabweichung der Messungen am geringsten war. Die „Hole“-Öffnung wurde auf 100 μm festgesetzt, da hier die

Intensität der Laserleistung bei der Messung auf der Probenoberfläche maximal ist. Um zu gewährleisten, dass bei den Raman-Messungen immer das gleiche Volumen angeregt wird und somit immer auf der Chipoberfläche gemessen wird, muss der Autofokus bei allen Spannungsmessungen aktiviert sein. Nur so sind die Messungen der einzelnen Punkte miteinander vergleichbar. Da für die Spannungsmessung eine möglichst gute spektrale Auflösung benötigt wird, ist für die Messung ein Gitter mit 1800 l/mm zu wählen.

Für die Bestimmung des Referenzwerts für nicht verspanntes Silizium werden regelmäßig die Peak-Positionen von einer Neon-Plasma-Linie und des Siliziumpeaks über 24 Stunden gemessen und daraus der Abstand gebildet. Um zu überprüfen, ob der berechnete Abstand zwischen dem Neonpeak und dem Siliziumpeak noch gültig ist und sich nicht beispielsweise durch Schwankungen der Laserwellenlänge verschoben hat, muss dieser Abstand vor jeder Spannungsmessung mit dem Raman-Spektrometer überprüft werden. Dies sollte jedoch mindestens einmal im Monat passieren. Dazu wird eine Messung mit den oben genannten Parametern durchgeführt. Der aus dieser Messung berechnete Abstand von Neon- und Siliziumpeak wird mit dem errechneten Abstand aus der 24 Stunden-Messung verglichen. Solange die Differenz zwischen Neon- und Siliziumpeak innerhalb eines Bereiches aus der dreifachen Standardabweichung der 24 Stunden-Messung liegt, hat der Wert der 24 Stunden-Messung für nicht verspanntes Silizium seine Gültigkeit. Dadurch ist es möglich Messungen über einen langen Zeitraum hinweg vergleichen zu können.

Im Kapitel 3.4. „Stabilität und Zuverlässigkeit der elektrischen Messung“ wurden zwei Systeme auf Zuverlässigkeit geprüft, da zur Spannungsmessung mit der piezo-resistiven Methode zwei unterschiedliche Systeme verwendet wurden. Zum einen handelt es sich dabei um den Spannungsmesschip, welcher bestimmte Schwankungen und eine bestimmte Zuverlässigkeit besitzt und zum anderen um den Nadeltester, welcher wiederum eine andere Zuverlässigkeit bezogen auf die Spannungsmessungen hat. Zunächst wurde das Messsystem Nadeltester untersucht und festgestellt, dass die Temperatur um den Nadeltester herum einer Schwankung von ungefähr 1 °C unterliegt. Die Temperatur im Nadeltester ist im Vergleich zur Raumtemperatur aufgrund der Elektronik und der reduzierten Luftzirkulation um 2 °C erhöht. Dennoch ist die Temperatur über die Dauer von einer kompletten Messserie auf einem Chip konstant. Dies ist auch notwendig, da der piezo-resistive Koeffizient temperaturabhängig ist (Kapitel 3.4.1. „Messsystem Nadeltester“). Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Eindruckkraft der Nadeln während der Messung einen Einfluss auf den berechneten Wert für die mechanische Spannung in der Nähe der Metallkontakte hat. So steigt die mechanische

Spannung mit zunehmender Eindruckkraft (Abbildungen 69 bis 72). Dieser Einfluss ist unabhängig von der Ausrichtung der Nadeln, denn auch die Erhöhung der Eindruckkraft auf die Pads parallel zur Y-Achse und der daraus resultierenden Bewegung der Nadeln in Y-Richtung zeigte den gleichen Anstieg der mit den benachbarten Transistoren gemessenen Spannung (Abbildungen 73 bis 76). Daher wurden alle Messungen mit minimaler Eindruckkraft der Nadeln durchgeführt. Zusätzlich wurden die Chips mittig auf den Pads kontaktiert, um nicht einen der benachbarten Transistoren mehr zu belasten als den anderen. Dieses Experiment und der zusätzlich durchgeführte Versuch, bei welchem Indents an verschiedenen Positionen auf verschiedenen Spannungsmesschips durchgeführt wurden (Abbildungen 77 bis 80), bestätigten zusätzlich die angenommene Auslesereihenfolge der Transistoren der einzelnen Strommessspiegel.

Für das Modellsystem Spannungsmesschip wurde festgelegt, dass aufgrund der in Kapitel 3.4.2. „Messsystem Spannungsmesschip“ gemessenen Schwankungen, welche besonders nach dem Wirebond-Prozess sehr hoch sind (Abbildung 81), jede Messung dreimal durchgeführt wird. Demzufolge ergibt sich aufgrund der in der Logik des Spannungsmesschips programmierten Wiederholung jeder Messung, eine Mittelung des jeweiligen Spannungswerts aus sechs Einzelmessungen.

Im nächsten Experiment (Kapitel 3.4.3. „Biegeversuch“) wurden auf einem Wafer an verschiedenen Positionen Spannungsmesschips aufgebracht (Abbildung 82). Anschließend wurde der Wafer durch einen Unterdruck konkav verbogen. Dadurch konnte gezeigt werden, dass durch die aus den Chips bestimmte mechanische Spannung, Aussagen über Richtung und Höhe auf der Chipoberfläche getroffen werden können. Daraus können wiederum Rückschlüsse auf die Verbiegung des Systems gezogen werden. Der Vergleich zwischen der Spannungsrichtung bestimmt aus den piezo-resistiven elektrischen Messungen und der Verbiegung des Trägerwafers zeigt, dass sowohl der Spannungsmesschip als auch der Trägerwafer konkav verbogen sind.

Das Kapitel 3.5.2. „Aufbau eines Modellchips“ zeigt leider, dass die Spannungszustände auf den Chips im Grundzustand bereits eine solch hohe Varianz haben, dass der Einfluss der einzelnen Prozessschritte nur in der Differenz aus der mechanischen Spannung vor und nach dem Prozess deutlich wird.

3.8.2. Probenpräparation

Die Probenpräparation am Beispiel des sehr vereinfachten Modells eines reinen nicht verspannten Siliziumchips sollte dazu dienen Präparationsmethoden zu finden, mit denen es möglich ist, die Oberfläche eines Chips zu bearbeiten, ohne dabei den Spannungszustand im Modellchip zu beeinflussen. Dabei wurden die Verfahren des mechanischen Schleifens und die Präparation mittels Focus Ion Beam untersucht (Kapitel 3.3.1. „Einfluss Probenpräparation“). Es wurde deutlich, dass durch das mechanische Schleifen mit einem grob gekörnten Schleifpapier die Oberfläche des Siliziums sehr stark geschädigt wird (Abbildung 32). Durch weitere Schleifschritte kann diese eingebrachte mechanische Spannung jedoch wieder reduziert und durch das abschließende Ionenpolieren nahezu komplett eliminiert werden (Abbildungen 34 und 35). Bei der Präparation mit dem Xenon-Plasma-FIB wird unabhängig von den Geräteparametern keine messbare mechanische Spannung in das Modellsystem des Siliziumchips eingebracht (Abbildung 39). Beide Verfahren eignen sich also grundsätzlich sehr gut als Präparationsmethode zum Freilegen von Oberflächen, bei welchen mit Hilfe der Raman-Spektroskopie die mechanischen Spannungen bestimmt werden sollen.

Um die mechanische Spannung über die Peak-Verschiebung des Siliziumpeaks auf dem Spannungsmesschip mit dem Raman-Spektrometer überhaupt erst messen zu können, musste zunächst die Imid-Passivierung entfernt werden. Durch das Imid wird zu viel Laserlicht absorbiert und in Molekülstreuungen im Imid umgewandelt, so dass kein Siliziumsignal mehr von der Chipoberfläche messbar ist. Hierzu wurde das Plasmaätzverfahren verwendet. Um auszuschließen, dass dieser Präparationsschritt die mechanische Spannung im Silizium beeinflusst, wurde die mechanische Spannung in Kapitel 3.5.1. „Einfluss der Probenpräparation“ vor und nach dem Plasmaätzen mittels piezo-resistiver elektrischer Messung gemessen. Der Einfluss auf die mechanische Verspannung des verwendeten Plasmaätzverfahrens ist kleiner als die Standardabweichung und damit unterhalb der Nachweisgrenze (Abbildung 99).

Während des Prozessierens der Spannungsmesschips und dem prozessbegleitenden Messen der mechanischen Spannungen mit der Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven elektrischen Messmethode sowie der Messung der Verbiegung mit dem Weißlichtinterferometer, hatte sich Silbersulfid auf den Kontaktpads gebildet (Abbildung 101). Dies führte dazu, dass die Haftung für die Wirebonds nicht mehr ausreichend gegeben war. Aus diesem Grund musste das Silbersulfid vor dem Wirebond-Prozess mit einem Argonplasma gereinigt werden. Um auch hier auszuschließen, dass dieser Prozessschritt die mechanische Spannung beeinflusst, wurden

testweise drei Spannungsmesschips mit den gleichen Prozessparametern behandelt wie die späteren Leadframe-Streifen. Vor und nach dem Plasmaätzprozess wurden die mechanischen Spannungen mit dem piezo-resistiven Verfahren auf den drei Chips bestimmt. Die Differenz der Spannungen vor und nach dem Prozess der Chips sind in den Abbildungen 103 und 104 dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass der Einfluss auf die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche kleiner ist, als die Schwankungen zwischen den einzelnen Messungen und somit nicht signifikant. Zusätzlich geht aus dieser Abbildung hervor, dass das Argonplasma-Verfahren geeignet ist das Silbersulfid zu entfernen.

3.8.3. Chipaufbau

Das prozessbegleitende Messen der Spannungsmesschips mittels Raman-Spektroskopie in Kapitel 3.3.2. „Aufbau eines Modellchips“ führte zunächst zu einer Reduzierung der Messpunkte. Erste Testmessungen zeigten, dass die Messzeit mit über 30 h pro Spannungsmesschip nicht praktikabel ist und an manchen Stellen kein Siliziumsignal gemessen werden konnte (Abbildung 40). Daraus resultierend wurde ein Mapping mit 20 Messpunkten in X-Richtung und 13 Messpunkten in Y-Richtung erstellt (Abbildung 41). Somit beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten ungefähr 130 μm und die Messzeit der Raman-Messung reduziert sich pro Spannungsmesschip auf circa 2 h. Jeder Spannungsmesschip wurde insgesamt dreimal mit dem Raman-Spektrometer gemessen und anschließend aus diesen Messungen der Mittelwert gebildet. Für die Darstellung des Einflusses der einzelnen Aufbauschritte auf die intrinsische mechanische Spannung wurden die Mittelwerte des gesamten Spannungsmesschips zu einem Wert zusammengefasst (Abbildung 42). Die Raman-Messungen zeigen, dass sich die mittlere Spannung nach dem Die Attach nur geringfügig ändert. Im Vergleich dazu ist die Änderung der mittleren mechanischen Spannung nach dem Wirebond-Prozess viel größer. Der Grund dafür ist das Erreichen der Glasübergangstemperatur T_G des Die Attach während des Wirebond-Prozesses. Das hat zur Folge, dass die Steifigkeit des Die Attach, wie durch TMA- und DMA-Messungen (Abbildungen 43 und 44) bestätigt, auf unter 1/7 der ursprünglichen Steifigkeit herabsinkt. Weiterhin wurde aus den prozessbegleitenden Raman-Messungen deutlich, dass es trotz der zuvor ausgewerteten Intensität des Siliziumpeaks aus Abbildung 40 immer noch Bereiche gibt, welche aufgrund der Metallisierungen kein Siliziumsignal liefern (Abbildungen 49 bis 51).

Darüber hinaus wurden zusätzlich aufgebaute Spannungsmesschips dazu verwendet den Wirebond-Prozess genauer zu untersuchen. So wurde gezeigt, dass der Einfluss vom Wirebonding auf die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche nicht gemessen werden kann (Abbildung 52), da der Einfluss des Setzens der Wirebumps auf die laterale mechanische Spannung kleiner ist als das Bond-Pad selbst (Abbildung 53). Diese Vermutung wurde durch die Messungen an einem mechanischen Schliff bestätigt. Der Schliff durch die Bumps und das Pad zeigt zudem, dass die Maximalspannung mittig unterhalb des Bumps liegt. Außerdem war aus den Raman-Messungen zu erkennen, dass sich die Spannung außerhalb der Bondfläche bereits auf die Hälfte reduziert hat. Zusätzlich zu der lateralen Ausdehnung der mechanischen Spannung durch den Wirebond-Prozess, geht aus Abbildung 53 hervor, dass der Einfluss in die Tiefe des Spannungsmesschips bis zu 80 μm reicht. Aus den angefertigten Schliffen war es außerdem möglich, den Einfluss des Die Attach auf den Chip sowohl direkt nach dem Die Attach-Prozess als auch nach dem erneuten Überschreiten der Glasübergangstemperatur T_G des Klebers beim Wirebond-Prozess zu messen. Die Abbildungen 55 und 56 bestätigen die Schlussfolgerungen aus Abbildung 42, dass der Die Attach-Prozess mechanische Spannungen im Chip nur geringfügig verändert. Ein Großteil der Werte liegt zwischen -2 MPa und 4 MPa (rot). Nach dem Wirebond-Prozess zeigt die Auswertung der mechanischen Spannung eine eher blaue (-30 MPa) bis gelbe Färbung (-10 MPa). Die Spannungswerte sind mittig am Interface zum Kupfer am größten (-30 MPa). Offensichtlich gibt es im Gegensatz zum Schrumpfverhalten des Klebers nach dem Die Attach beim Schrumpfverhalten des Die Attach nach dem Wirebond-Prozess einen deutlichen Gradienten zum Rand des Klebers hin. Dadurch besitzt auch die mechanische Spannung einen Gradienten zum Rand des Spannungsmesschips. Auch der Vergleich der Histogramme aus Abbildung 57 spiegelt wider, was bereits in Abbildung 42 zu sehen ist. Die Spannungen nach dem Wirebond-Prozess zeigen eine deutlich höhere Anzahl an negativen Spannungswerten (-4 MPa bis -12 MPa) als das Histogramm der Messung, welches nach dem Die Attach gemacht wurde.

Bei der Auswertung der Ergebnisse aus den piezo-resistiven Messungen, welche nicht prozessbegleitend durchgeführt worden sind, ist zu erkennen, dass sich die Spannung in X- und Y-Richtung nach den einzelnen Prozessen ändert. Der Verlauf zeigt im Vergleich zu den Raman-Messungen einen leicht anderen Verlauf der Abhängigkeiten vom Prozess und der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche. Im Gegensatz zu den Raman-Messungen, bei welchen die Spannungsänderungen nach dem Die Attach sehr gering waren, aber dafür nach dem Wire Bond-Prozess umso größer, ist die Spannungsänderung gemessen mit der piezo-resistiven Messmethode nach dem Die Attach groß und nach dem Wirebond-Prozess wiederum

sehr klein. Scheinbar ist die Änderung der Spannung nach dem Wirebond-Prozess durch das Herabsinken der Steifigkeit des Die Attach während des Wirebondings aufgrund von Prozesstemperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur nicht messbar. Demzufolge scheint die Raman-Messung sensitiver für die Änderung der mechanischen Spannung während des Chipaufbaus zu sein. Der Vorteil der piezo-resistiven Messmethode gegenüber der Raman-Messung ist die Möglichkeit, die Tensoren der mechanischen Spannung zu bestimmen und darzustellen. Dies wäre bei der Raman-Spektroskopie nur mit zusätzlichen Polarisatoren und höheren Spannungen möglich.

Dass der Vergleich der Mittelwerte der mechanischen Spannung von unterschiedlichen Spannungsmesschips aus unterschiedlichen Prozessschritten durchaus ähnliche Werte geliefert hat, zeigt der Vergleich des Experiments, bei welchem die Chips prozessbegleitend gemessen wurden. Der Vergleich der einzelnen Positionen bei unterschiedlichen Prozessen ist jedoch nur möglich, wenn man ein und denselben Chip nach jedem Prozessschritt misst, da die Varianz über die unterschiedlichen Spannungsmesschips (Kapitel 3.4.2. „Messsystem Spannungsmesschip“) zu groß ist. Dieser Vergleich (Abbildungen 107 und 108) zeigt, dass die Spannungswerte in X-Richtung nach dem Die Attach-Prozess im Mittel um $2,37 \text{ MPa} \pm 0,6 \text{ MPa}$ größer werden und nach dem Wirebond-Prozess in X-Richtung um $1,33 \text{ MPa} \pm 1,04 \text{ MPa}$ kleiner werden. In Y-Richtung verhält sich die Spannung entgegengesetzt zur X-Richtung. Nach dem Die Attach-Prozess sinkt die Spannung erst um $2,37 \text{ MPa} \pm 0,94 \text{ MPa}$ und steigt nach dem Wirebond-Prozess um $1,26 \text{ MPa} \pm 0,85 \text{ MPa}$ an. Begründet wird dies durch den piezo-resistiven Effekt.

Der Vergleich vom Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die mechanische Spannung im jeweiligen Chip zeigt, dass der Einfluss auf die mechanische Spannung in X- und in Y-Richtung des Die Attach größer ist als der Einfluss des Wire Bond-Prozesses (Abbildung 107 und 108 im Kapitel 3.5.2. „Aufbau eines Modellchips“). Auch in den Abbildungen 109 bis 116 ist erkennbar, dass sich die mechanische Spannung nach dem Die Attach mit -3 MPa bis 5 MPa in X-Richtung und im Zentrum des Chips beziehungsweise mit 1 MPa bis -7 MPa in Y-Richtung viel stärker ändert als nach dem Wirebond-Prozess. Beim Wirebonding liegen die Änderungen der Spannung in X-Richtung im Bereich zwischen 0 MPa und $-1,5 \text{ MPa}$ beziehungsweise in einem Bereich von $-0,5 \text{ MPa}$ bis $2,5 \text{ MPa}$ in Y-Richtung. Das steht im Widerspruch zu den Ergebnissen aus den prozessbegleitenden Raman-Messungen, da dort der Einfluss des Wirebond-Prozesses größer war als der Einfluss des Die Attach.

Die Auswertungen der Änderung der mechanischen Spannung nach den einzelnen Prozessschritten am Beispiel der Spannungsmesschips 12_2 und 16_2 im Kapitel 3.5.2. „Aufbau eines Modellchips“ zeigen, dass der Einfluss des Die Attach in der Mitte und am rechten beziehungsweise linken Rand der Chips am stärksten ist und hin zu den oberen und unteren Rändern abnimmt (Abbildungen 109 bis 116).

Der lokale Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung in der Ebene um die Bond-Pads herum, konnte auch mit Hilfe der piezo-resistiven Messung nicht nachgewiesen werden. Die Abbildungen 117 und 118 zeigen, dass die Schwankungen auf dem Chip größer sind als der messbare Einfluss der Bumps.

Zusätzlich zu den Spannungsmessungen mit der Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven elektrischen Messmethode wurde die Biegung der Chips nach den einzelnen Prozessschritten mittels Weißlichtinterferometer gemessen. Mit Hilfe der Chipbiegung sollte der Einfluss des Die Attach genauer untersucht werden. So kann zum Beispiel ein starker Schrumpf des Die Attach zu Verbiegungen des Chips führen, welche wiederum zu messbaren Spannungsunterschieden im und auf dem Chip führen. Demnach sollte es möglich sein, die Spannungsänderungen mit der Chipbiegung zu korrelieren. Auf allen 30 Spannungsmesschips wurde die Verbiegung in horizontaler (lange Seite des Chips) und in vertikaler Richtung (kurze Seite des Chips) gemessen. Als erste Ergebnisse aus den Weißlichtinterferometer-Messungen konnte gezeigt werden, dass beim Messen der Verbiegungen von Chips mit Imid nicht die Oberfläche des Chips, sondern vielmehr die Oberfläche des Imids gemessen wurde (Abbildung 143 in Kapitel 3.7. „Ergebnisse zusätzlicher Analysen“). Dadurch sank zwar die Anzahl der für diese Messungen relevanten Chips von 30 auf 10, aber auch die Verbiegungen der 10 Chips zeigen eine deutliche Abhängigkeit von den einzelnen Prozessschritten. So zeigt die Abbildung 139, dass bei einem Großteil der Chips die Biegung nach dem Die Attach-Prozess zunimmt und dann nach dem Wirebond-Prozess wieder kleiner wird. Lediglich bei einem Chip nimmt die Biegung nach dem Wirebonding noch einmal zu. Bei einem weiteren Chip ändert sich die Biegung nach dem Wire Bond-Prozess nicht. Diese können als Ausreißer angesehen werden.

Bei der Auswertung der vertikalen Biegung ist der Einfluss vom Die Attach viel kleiner als in horizontaler Richtung (Abbildung 140). Einige der Chips zeigen keine Änderung der Biegung in vertikaler Richtung nach dem Die Attach-Prozess. Der Wirebond-Prozess hingegen zeigt bei der Auswertung der vertikalen Höhenprofile einen größeren Einfluss als der Die Attach-Prozess. Im Vergleich zur horizontalen Biegung sind die Werte der vertikalen Biegung nahezu gleich groß. Beim Vergleich beider Messungen fällt zudem auf, dass die Streuung der

maximalen Biegungen in horizontaler Richtung (Abbildung 139) stärker ist als die maximalen Biegungen in vertikaler Richtung (Abbildung 140).

Der Vergleich der gemessenen Biegungen von Chip 12_2 mit den mechanischen Spannungen dieses Chips, welche mittels der piezo-resistiven elektrischen Messungen gemessen wurden, zeigen, dass sich die Ergebnisse beider Verfahren gegenseitig bestätigen. So ist die gemessene Spannungsänderung nach dem Die Attach in Y-Richtung sehr klein und im Vergleich dazu die Biegung an dieser Stelle des Chips sehr gering. Auch in X-Richtung stimmt die Spannungsänderung mit der gemessenen Biegung überein, da die Biegung in der Mitte des Spannungsmesschips vergleichsweise groß ist, ebenso die gemessene Spannungsänderung auf diesem Chip. Das gleiche gilt auch für die Messungen beider Verfahren nach dem Wirebond-Prozess. Zusätzlich ist es möglich anhand der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche eine Aussage über die Biegung des Chips zu treffen. So ist die Biegung des Chips 12_2 nach dem Die Attach abgeleitet aus der mechanischen Spannung konvex. Die an dieser Stelle mit dem Weißlichtinterferometer gemessene Biegung ist ebenfalls konvex und stimmt somit mit der aus der mechanischen Spannung abgeleiteten Biegung überein.

Die konvexe Biegung des Chips kann auch aus der Finite Elemente Simulation in Abbildung 135 aus Kapitel 3.6.1. „Simulation der Prozessschritte“ abgeleitet werden. Auch nach dem Wirebond-Prozess bleibt die Chipbiegung konvex. Allerdings nimmt die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche im Vergleich zum Die Attach um 55 MPa in X-Richtung und um 47 MPa in Y-Richtung ab (Abbildung 135). Demnach wird auch durch die Simulation bestätigt, dass sich die Spannung nach dem Wirebond-Prozess an der Chipoberfläche durch die Änderung der Steifigkeit des Die Attach deutlich ändert. Der Mold-Prozess beeinflusst die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche am stärksten. Die Chipoberfläche ist nun komplett Druckverspannt und die mechanischen Spannungen steigen bis auf -107 MPa in X-Richtung und -76 MPa in Y-Richtung. Auch die Auswertungen der Spannung in X-Richtung aus den piezo-resistiven Messungen bestätigt die Druckspannung. Hier änderte sich die mechanische Spannung σ_{xx} auf der Chipoberfläche allerdings nur um ungefähr 8 MPa (Abbildung 105 in Kapitel 3.5.2. Aufbau eines Modellchips).

Die Betrachtung der simulierten Spannung in Y-Richtung an den Chipseiten zeigt, dass der Die Attach und der Wirebond-Prozess kaum einen Einfluss auf die betrachteten Chipseiten haben. Die Spannungen in Y-Richtung nach den beiden Prozessen liegt nahezu auf der kompletten Chipseite bei -10 MPa. Lediglich nach dem Mold-Prozess ändert sich die Spannung nahe den Chipkanten und zeigt Spannungswerte von bis zu -60 MPa.

Die Simulation der Spannung in X-Richtung, betrachtet an der Chipseite, zeigt ähnlich wie die Betrachtung der simulierten Spannung auf der Chipoberfläche, dass der Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung im Vergleich zum Einfluss des Die Attach und des Mold-Prozesses relativ gering ist. Nach dem Die Attach zeigt die Chipoberkante Zugspannungen im Bereich von 67 MPa bis 127 MPa und in der Nähe des Die Attach Druckspannungen im Bereich von -85 MPa bis -27 MPa. Der Einfluss des Die Attach am Interface zum Kleber ist bei den Raman-Messungen nicht ganz deutlich zu sehen, da hier ein Teil des Die Attach durch das mechanische Schleifen entfernt wurde. Dennoch ähneln sind die Farbverläufe der Simulation mit den Raman-Messungen. Beide Verfahren zeigen an der Chipoberkante Zugspannungen und an der Grenzfläche zum Die Attach Druckspannungen. Die absoluten Spannungswerte zeigen einen Unterschied von bis zu 80 MPa an der Chipoberseite und 60 MPa an der Chipunterseite. Dieser Unterschied kommt dadurch zustande, dass bei den Raman-Messungen die uniaxiale Spannung betrachtet wird und nicht die einzelnen Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} wie es bei der Simulation der Fall ist.

Der Vergleich zwischen den Raman-Messungen und der Simulation des Wirebond-Prozesses zeigt an der Grenzschicht zum Die Attach eine hohe Übereinstimmung. Beide Verfahren zeigen Druckspannungen und auch die Spannungsbereiche in denen die Spannungen an der Unterseite des Chips liegen ähneln sich sehr stark. Der Spannungsbereich am Interface zwischen Chip und Kleber der Simulation liegt zwischen -31 MPa und -16 MPa (Abbildung 136) und der Spannungsbereich der Raman-Messung zwischen -30 MPa und -10 MPa (Abbildung 137 (B)). Bei der Chipoberseite sind aufgrund der Bumps deutliche Unterschiede zwischen den Raman-Messungen und der Simulation zu erkennen. Zusätzlich gibt es vereinzelte Bereiche in der linken und rechten oberen Ecke des Chips, in welchen die aus den Raman-Messungen berechnete Spannung mit bis zu 30 MPa von der Simulation abweicht. Zusätzlich weichen die Werte der mechanischen Spannung in der Mitte des Chips, welche aus den Messungen der Raman-Spektroskopie berechnet wurden, von den simulierten Spannungswerten mit bis zu 50 MPa stark voneinander ab. Vermutlich wird die mechanische Spannung in der Nähe der Chipoberfläche sehr stark von den Metallisierungen beeinflusst.

Am deutlichsten ist der Unterschied der Spannungswerte zwischen den Raman-Messungen und der Simulation nach dem Mold-Prozess zu erkennen. Nach diesem Prozess liegt die Spannungsdifferenz beiden Verfahren zwischen 88 MPa und 121 MPa. Die mechanischen Spannungen an der Chipseite zeigen außerdem entgegengesetzte Spannungsrichtungen. Die Chipseite ist bei der Simulation hauptsächlich druckverspannt und bei der Raman-Messung

hingegen zugverspannt. Da die Raman-Messungen hauptsächlich an den äußeren Rändern Druckspannungen zeigen, wird vermutet, dass hier das durch das mechanische Schleifen entfernte Mold Compound den Spannungszustand auf der Chipseite beeinflusst. In den Bereichen, in denen außen herum noch genügend Mold Compound vorhanden ist, stimmen die Spannungsrichtungen der Raman-Messung mit der Simulation nämlich gut überein. Zusätzlich bestätigt die Simulation der partiellen Dekapsulierung in Abbildung 140 aus Kapitel 3.6.2. „Simulation der partiellen Dekapsulierung“, dass sich die mechanische Spannung im Mittel bis 100 MPa ändert.

Allerdings sind bei den Spannungsverläufen auch Gemeinsamkeiten zu erkennen. So liegen die Maximalwerte der Spannungen beider Verfahren jeweils in der linken und rechten oberen Ecke des Chips (Abbildung 136 und Abbildung 137 (C)).

Die Gegenüberstellung der simulierten Spannung auf der Chipoberfläche und der berechneten Spannung aus den piezo-resistiven elektrischen Messungen zeigen deutliche Unterschiede in den Spannungswerten und im Spannungsverlauf. Beim Die Attach-Prozess liegt der Unterschied der mechanischen Spannung in X-Richtung bei 123 MPa bis 125 MPa und in Y-Richtung bei 98 MPa bis 99 MPa. Nach dem Wirebond-Prozess wird die Differenz beider Methoden zwar geringer, ist aber dennoch sehr groß im Vergleich zu den bestimmten Spannungswerten. So liegt die Differenz zwischen der Simulation und der elektrischen Messung nach dem Wirebond-Prozess in X-Richtung bei 77 MPa und in Y-Richtung bei 69 MPa. Hier kann die Temperaturabhängigkeit der Summenspannung aus der piezo-resistiven elektrischen Messung durchaus eine große Rolle spielen, da beide Spannungskomponenten über die halbierte Summe beziehungsweise halbierte Differenz aus Summen- und Differenzspannung berechnet werden (Formel [218] und [219] in Kapitel 2.3. „Der Spannungsmesschip basierend auf dem piezo-resistiven Effekt“). Zusätzlich zeigen die elektrischen Messungen, dass die Spannungsmesschips durch ihre Herstellung bereits im Grundzustand eine Vorspannung von 25 MPa bis -30 MPa besitzen.

Der Vergleich der Mittelwerte der mechanischen Spannungen aus der Simulation, der Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven elektrischen Messung zeigt zwar ähnliche Kurvenverläufe, aber die Spannungswerte unterscheiden sich ebenfalls sehr stark. Demnach ist es nicht möglich, die Mittelwerte der mechanischen Spannungen aus den drei Methoden miteinander zu vergleichen, da die Abweichungen der einzelnen Methoden bei den einzelnen Prozessen zu groß sind.

3.8.4. Partielles Dekapsulieren

Die Idee hinter dem partiellen Dekapsulieren war das Ermöglichen von Spannungsmessungen mittels der Raman-Spektroskopie. Mit Hilfe des mechanischen Schleifprozesses wurde von zwei Spannungsmesschips das Mold Compound auf einer Seite entfernt. Dadurch war es möglich, den Einfluss des Mold-Prozesses auf die mechanische Spannung über die komplette Chipdicke zu messen.

Die Ergebnisse der Raman-Messungen in Abbildung 58 (A) und (B) an beiden dekapsulierten Chips zeigen ein ähnliches Spannungsbild. Das bedeutet, dass das Molding die mechanische Spannung unabhängig vom Chip beeinflusst. Die ausgewerteten Peak-Verschiebungen zeigen, dass die beiden gemessenen Spannungsmesschips am Interface zum Die Attach Zugspannungen mit bis zu 40 MPa aufweisen. Die jeweils obere linke und obere rechte Ecke des Chips zeigen Druckspannungen mit Werten zwischen -2 MPa und -40 MPa. Die Oberkante des Chips weist ähnliche Spannungswerte auf und ist damit druckverspannt. Vernachlässigt man die Zugspannung an der Oberseite des Chips, da diese vermutlich von der Metallisierung kommt, so zeigt der Chip eine leicht konvexe Verbiegung. Im Vergleich zum Wirebond-Prozess hat die Biegung des Chips deutlich abgenommen.

Der Einfluss des mechanischen Präparierens dieser beiden Spannungsmesschips für die Raman-Messung wurde mit Hilfe der piezo-resistiven elektrischen Messungen in Kapitel 3.5.3. „Partielle Dekapsulierung“ untersucht. Die elektrischen Messungen beider Chips zeigen, dass sich sowohl die mechanischen Spannungen in X- als auch in Y-Richtung durch das Entfernen des Mold Compounds ändern. Beide Messungen zeigen dieselbe Spannungsänderung im Bereich des entfernten Mold-Compounds und damit den gleichen Einfluss durch die mechanische Präparation. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass sich die mechanischen Spannungen auf dem gesamten Chip ändern, obwohl lediglich auf einer Seite das Mold Compound entfernt wurde. Die gemessenen Spannungsänderungen liegen im Bereich von 2 MPa und 22 MPa in X-Richtung und im Bereich von -5 MPa bis -23 MPa in Y-Richtung. Da der gemessene Einfluss unabhängig vom Chip ist, ist es möglich, die Spannungsänderungen an der Oberseite mit Hilfe der bestimmten Spannungsdifferenz zu korrigieren. Somit kann der Einfluss des Mold Compounds herausgerechnet werden.

Da das komplette Entfernen des Mold Compounds über einer bestimmten Chipfläche die mechanische Spannung zu stark beeinflusst, wurde im nächsten Versuch das Volumen des entfernten Mold Compounds reduziert. An zuvor definierten 24 Löchern wurde das Mold

Compound mittels Mikrofräse entfernt. Die 24 Löcher wurden so gewählt, dass es anhand der Raman-Messungen in diesen Löchern möglich ist, eine Aussage über die Spannungsverteilung auf der Oberfläche des Chips zu treffen. In einem weiteren Experiment wurde die Anzahl der Löcher nochmals auf sechs reduziert, da die Änderung der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche beim Fräsen der 24 Löcher zu groß war. Parallel dazu wurde das Mold Compound über dem Chip in 100 µm dicken Schichten mit einem Laser abgetragen. Nach jedem Dekapsulierschritt wurde die Änderung der mechanischen Spannung auf der Chipoberfläche mit der piezo-resistiven Messmethode bestimmt. Aus dem Vergleich der Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, wieviel Mold Compound entfernt werden darf, ohne dass sich dabei die mechanische Spannung im Chip selbst ändert. Das Entfernen des Mold Compounds an definierten Stellen mittels Laser war durch die Charakteristik des Mold Compound nicht möglich, da während des Dekapsulierens SiO₂-Partikel aufgeschmolzen sind und diese nicht mehr entfernt werden konnten.

Die Abbildung 125 aus Kapitel 3.5.3. „Partielle Dekapsulierung“ zeigt die Änderung der Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} nach jeder dekapsulierten 100 µm dicken Mold Compound-Schicht. Dabei wurde die Spannung der jeweiligen Komponente über den gesamten Chip gemittelt. Aus den beiden Graphen geht hervor, dass die mechanische Spannung in Y-Richtung im Vergleich zur Spannung in X-Richtung weniger stark abnimmt. Der Grund dafür ist, dass in Y-Richtung aufgrund der Maße des Bauteils weniger Mold Compound abgetragen wird. Nach dem fünften Dekapsulierschritt ändert sich das Vorzeichen beider Spannungskomponenten und in X-Richtung wird aus der Druckspannung eine Zugspannung und in Y-Richtung wird aus der Zugspannung eine Druckspannung. Die Dicke des entfernten Mold Compounds beträgt nach dem fünften Dekapsulierschritt 0,75 µm. Bei einer Restdicke des Mold Compounds von ungefähr 0,4 µm ändert sich die Spannung nicht mehr linear, sondern exponentiell. Die Anstiege der jeweiligen Graphen ändern sich von $m=8,4$ zu $m=39,6$ für σ_{xx} und von $m=-2,5$ zu $m=-45,3$ für σ_{yy} . Der neunte Dekapsulierschritt wurde nicht betrachtet, da sich hier die Spannung nicht allein durch das entfernte Mold Compound ändert, sondern zusätzlich durch die verwendete Einbettmasse, welche notwendig war, um die Pins zu fixieren.

Die Betrachtung der mechanischen Spannungen auf dem Chip vor dem Dekapsulieren und nach dem achten Dekapsulierschritt (Abbildung 126 und Abbildung 127) zeigt, dass sich die Spannungen hauptsächlich in der Mitte des Spannungsmesschips ändern. Die Spannungsänderung von σ_{xx} liegt in der Mitte zwischen 10 MPa und 17 MPa und in Y-Richtung

ändert sich die Spannung in der Mitte des Chips zwischen -5 MPa und -17 MPa. An den Rändern des Chips sind die Spannungsänderungen von σ_{xx} und σ_{yy} am geringsten.

Durch das Entfernen des Mold Compounds oberhalb des Chips mittels Laserdekapsulieren ist es zwar möglich, die Oberfläche für die Raman-Messungen freizulegen, dennoch ändert sich die Spannung mit bis zu 17 MPa in X-Richtung und bis zu -17 MPa in Y-Richtung so stark, dass sich sogar die Spannungsrichtung von Zugspannung in Druckspannung und umgekehrt ändert. Schon nach dem ersten Dekapsulierschritt von 100 μm Mold Compound ändert sich die mechanische Spannung auf dem Chip. Dieses Verfahren ist somit also nicht geeignet, um die Chipoberfläche für die Spannungsmessungen mittels der Raman-Spektroskopie freizulegen.

Die Simulation dieses Experiments in Kapitel 3.6.2. „Simulation des partiellen Dekapsulierens“ zeigt, dass sich die mechanische Spannung bis zu einer dekapsulierten Mold Compound-Dicke von 800 μm bis 1000 μm nur leicht ändert. Die Spannungsänderung liegt in X-Richtung bei 10 MPa und in Y-Richtung bei 5 MPa. Die Spannungsdifferenz bei der piezo-resistiven Messmethode aus Kapitel 3.5.3. „Partielle Dekapsulierung“ liegt im Vergleich dazu in X-Richtung bei 9 MPa und in Y-Richtung bei 3 MPa. Der Unterschied zwischen der Simulation und dem Experiment ist sehr gering und lässt demnach die Schlussfolgerung zu, dass die Simulation durch das Experiment bestätigt wurde. Zusätzlich zu dem Einfluss des Dekapsulierens des Mold Compounds auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche wurde der Einfluss auf die mechanische Spannung an der langen Chipseite ausgewertet. Die Auswertung zeigt, dass sich die mittlere Spannung an der Chipseite in X-Richtung bis 600 μm entferntes Mold Compound um 3 MPa ändert und in Y-Richtung bis 800 μm entferntes Mold Compound auch um 3 MPa ändert. Steigt die Dicke des dekapsulierten Mold Compounds, dann nimmt die Spannungsänderung stark zu. So ist die mittlere Spannungsänderung von σ_{xx} während des Entfernens der letzten 800 μm 33 Mal so groß, wie die Spannungsänderung während des Dekapsulieren der ersten 600 μm Mold Compound. Die mittlere Spannungsänderung beim Dekapsulieren der letzten 600 μm Mold Compound von σ_{yy} ist 10 Mal höher als die Spannungsänderung während der ersten 800 μm . Demnach beträgt die Spannungsänderung in X-Richtung an der Chipseite 100 MPa und in Y-Richtung 80 MPa. In X-Richtung ändert sich zusätzlich noch die Spannungsrichtung von Druck- in Zugspannung.

Der Vergleich zwischen der Spannungsdifferenz von σ_{xx} , welche aus der Simulation bestimmt wird, und der Spannungsdifferenz von σ_{xx} , welche aus der piezo-resistiven Messmethode berechnet wird, zeigt eine hohe Übereinstimmung bis zu einer dekapsulierten Mold Compound-Dicke von 600 μm . Die Werte der experimentell bestimmten Spannungsdifferenzen in Y-

Richtung liegen unterhalb der simulierten Spannungsdifferenzen und auch der Anstieg der simulierten Spannungsdifferenzen ist viel größer. Das bestätigt, dass zumindest die mittels piezo-resistive Messmethode bestimmte Spannung in X-Richtung mit der simulierten Spannung in X-Richtung übereinstimmen und somit die Simulation experimentell bestätigt ist.

Die Auswertung des Einflusses durch die 24 gefrästen Löcher in Abbildung 128 und 129 zeigt, dass sich die Spannung in der Nähe der gefrästen Löcher deutlich ändert. Die Spannungsänderung in X-Richtung liegt zwischen 5MPa und 17MPa und in Y-Richtung zwischen -6MPa und -17MPa. Auf dem Rest des Spannungsmesschips ist die Spannungsänderung mit Werten zwischen 4MPa und -3MPa sehr viel kleiner. Beim Dekapsulieren der letzten 400µm nimmt die mechanische Spannung auf der Chipoberfläche, im Vergleich zu den ersten 1000µm, drei- bis fünfmal so stark ab. Experimentell konnte dies aufgrund vom notwendigen Einbetten des Chips während des Dekapsulierens und der damit verbundenen Beeinflussung der mechanischen Spannung nicht bestätigt werden. Allerdings wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Übereinstimmung von Simulation und Experiment bei den ersten dekapsulierten 1000µm Mold Compound auch der Rest der Simulation richtig ist.

Aus diesem Grund wurde die Anzahl der zu fräsenden Löcher auf sechs reduziert, um den Einfluss auf die mechanische Spannung im Chip zu reduzieren. Tatsächlich reduzieren sich die Bereiche, an denen sich die mechanische Spannung ändert.

Die Erkenntnisse aus den Versuchen sind leider nicht auf die Problemstellung anwendbar, da alle Experimente in Kombination gezeigt haben, dass eine Volumenentnahme vom Mold Compound zu einer Änderung des Spannungszustandes führt. Es ist aber dennoch möglich, aus den Erkenntnissen dieser Arbeit den Einfluss des Entfernens des Mold Compounds nominell zu bestimmen und die daraus bestimmte Spannungsänderung später als Korrekturfaktor für die Raman-Messungen zu verwenden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass das mechanische Schleifen sehr gut als Präparationsmethode für die Spannungsmessungen geeignet ist, da es nach dem Ionenpolieren eine nicht verspannte Oberfläche hinterlässt.

4. Diskussion

4.1. Messung mechanischer Spannungen mittels Raman-Spektroskopie und piezo-resistiver Messmethode an prozessierten Siliziumchips

4.1.1. Erkenntnisse dieser Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die beiden experimentellen Messmethoden Raman-Spektroskopie und piezo-resistive elektrische Messung charakterisiert. Aus diesen Untersuchungen entstanden Messvorschriften für die Messungen der mechanischen Spannung mit der jeweiligen Messmethode, welche den Einfluss der Messungen selbst auf die mechanische Spannung minimieren soll. Dabei wurde unter anderem die Informationstiefe des Raman-Spektrometers im Silizium bestimmt. Diese liegt bei der verwendeten Wellenlänge von 532 nm des Nd:YAG Lasers bei 1 μm . Der Referenzwert aus der Literatur (De Wolf, et al., 1998) liegt ebenfalls bei 1 μm . Da die Informationstiefe mit Hilfe eines mittels mechanischen Schleifens angefertigten Siliziumkeils bestimmt wurde, ist es möglich, die Informationstiefe eines beliebigen Materials mit einem angefertigten Keil, welcher aus dem entsprechenden Material besteht, zu bestimmen. Diese Methode zur Bestimmung der Informationstiefe ist für Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen anwendbar. Wird die Wellenlänge allerdings sehr klein und liegt beispielsweise mit 266 nm im Bereich des ultravioletten Lichts, kann die Rauheit der Proben einen großen Einfluss auf die ermittelte Informationstiefe haben. So liegt die Informationstiefe eines Lasers mit einer Wellenlänge von 457 nm bei 37 nm (De Wolf, et al., 1998). Die Rauheit muss also sehr viel kleiner sein als 36 nm. Eine weitere Grenze der Methode ist die Schichtdicke des Materials, in welcher die Informationstiefe bestimmt werden soll. Die Schichtdicke muss ausreichend groß sein, um einen Keil daraus anfertigen zu können. Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde versucht die Informationstiefe im Galliumnitrid zu bestimmen. Die maximal zur Verfügung stehende Schichtdicke war 2 μm Galliumnitrid, welches auf Silizium aufgebracht war. Während der Präparation des Keils löste sich das Galliumnitrid vom Silizium, da die Schichtdicke vom Galliumnitrid durch die Keilform immer geringer wurde und die Schichthaftung auf dem Silizium nicht mehr ausreichend war.

Die durch diese Doktorarbeit festgelegte Messvorschrift für die Raman-Messung besagt, dass mechanische Spannungen mit einer Messzeit von 2×10 s und einer auf 25 % reduzierten Laserleistung durchgeführt werden müssen. Zusätzlich muss stets der Autofokus aktiviert sein. Die Messvorschrift basiert auf unterschiedlichen Experimenten. In einem ersten Experiment wurde der Einfluss der Laserleistung untersucht, welche über einen Filter verändert wurde.

Beim zweiten Experiment wurde die Messzeit variiert und die Laserleistung konstant gehalten. Die konstante Laserleistung entspricht dem Wert aus dem ersten Ergebnis, bei der kein Einfluss auf die Peak-Verschiebung gemessen werden konnte. Bei diesen Experimenten wurde ein 90/10 Strahlteiler verwendet, welcher 90 % des Laserlichtes auf die Probe und 10 % von der Neon-Plasma-Quelle in den Strahlengang des reflektierten Laserlichtes transmittiert. Der Grund warum die Messzeit im zweiten Experiment nicht kleiner als 2x1s gewählt wurde, ist das Signal-Rausch-Verhältnis des Neonpeaks. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird mit kürzer werdender Messzeit immer schlechter, da der Neonpeak immer kleiner wird. Berücksichtigt man, dass für die Spannungsmessungen die Laserleistung auf 25 % reduziert wird, wäre der Einsatz eines Strahlteilers denkbar, welcher weniger Laserleistung auf die Probe lässt, dafür aber mehr Intensität der Neon-Plasma-Quelle in der Strahlengang des reflektierten Lichtes transmittiert. Solch ein Strahlteiler wäre zum Beispiel ein 70/30 Strahlteiler. Es müsste zwar dann die Laserleistung erhöht werden, um vergleichbare Ergebnisse wie beim 90/10 Strahlteiler zu erhalten, es könnte dann aber auch die Messzeit reduziert werden.

Eine weitere Messvorschrift ist das Bestimmen des Abstands vom Neon- und Siliziumpeak und der Vergleich dieses Wertes mit einer Langzeitmessung. Das regelmäßige Überprüfen dieses Abstands soll Schwankungen der Laserquelle aufzeigen und somit verhindern, dass ein falscher Referenzwert für den Abstand von Neon- und Siliziumpeak, gemessen auf einem nicht verspannten Siliziumchip, verwendet wird, um die absolute Peak-Verschiebung und daraus die mechanische Spannung zu bestimmen. Zusätzlich sichert diese Überprüfung die Vergleichbarkeit von Spannungsmessungen über einen langen Zeitraum und bestätigt die Richtigkeit der gemessenen Peak-Verschiebung und der mechanischen Spannung. Gerade letzteres ist für die Kunden eines Dienstleisters wie die Fehleranalyse von großer Bedeutung. Durch den Vergleich mehrerer 24 Stunden-Messungen und der Auswertung der Standardabweichung aus diesen Messungen kann langfristig entschieden werden, ob eine kurze Referenzmessung ausreicht. Sollte beispielsweise bei der Bestimmung der Standardabweichungen nach 24 Stunden und beispielsweise nach 6 Stunden herauskommen, dass beide Werte gleich sind oder sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, kann die Dauer der Referenzmessung auf 6 Stunden reduziert werden.

Die Charakterisierung der piezo-resistiven elektrischen Messung zeigt, dass es bei den einzelnen Messungen prozessabhängige Schwankungen der Ergebnisse gibt. Als Schlussfolgerung daraus, wurde festgelegt, dass jede Messung drei Mal wiederholt wird. Statistisch gesehen sind drei Messung gerade bei großen Schwankungen der gemessenen

Spannung nicht ausreichend. Da das einmalige elektrische Auslesen eines Spannungsmesschips allerdings 8 Minuten dauert, beträgt die Gesamtzeit für alle drei Messungen auf einem Chip somit 24 Minuten. Würde man die Anzahl der Wiederholungen einer Messung pro Chip erhöhen, würde so auch die gesamte Messzeit steigen. Die drei Wiederholungen waren ein Kompromiss zwischen Gesamtmessdauer und Zuverlässigkeit der gemessenen mechanischen Spannungen. Wenn man die Zeit für das Auslesen eines Spannungsmesschips reduziert, könnte man in die Anzahl der Messungen pro Chip erhöhen. Das Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS besitzt zum Beispiel eine Auswertelektronik inklusive einer anderen Software, mit welcher es möglich ist, diesen Spannungsmesschip mit 16 Millisekunden pro Transistor auszulesen (Schindler-Saefkow, et al., 2013). Die Messung eines Spannungsmesschips mit 60 Transistoren würde demnach nur 0,96 Sekunden dauern.

Ein Experiment zur Charakterisierung des Spannungsmesschips war die Überprüfung der Reihenfolge der einzelnen Transistoren beim elektrischen Auslesen. In einigen der vergangenen Abschlussarbeiten (Schubert, 2008) an diesem Spannungsmesschip wurde diese nicht dokumentiert. Die Kenntnis der Reihenfolge des Auslesens ist für diese Doktorarbeit notwendig, da hier die Ergebnisse aus der piezo-resistiven elektrischen Messung mit den Raman-Messungen verglichen werden sollte. Aus diesem Grund wurden an bestimmten Positionen auf dem Chip Indents in der Nähe eines Transistors gesetzt und untersucht, welcher der Transistoren die größte Spannungsdifferenz zur Messung vor dem Indentieren zeigt. Die Ergebnisse aus den Nanoindentationsversuchen stimmen mit der in (Rost, 2013) gezeigten Nummerierung überein.

Nachdem die Methoden zur Charakterisierung beider Messverfahren untersucht wurden, wurden verschiedene Präparationsverfahren und deren Einfluss auf die mechanische Spannung untersucht. Das Ziel war ein Verfahren zu finden, mit dem es möglich ist, Bereiche für Spannungsmessungen mittels Raman-Spektroskopie zugänglich zu machen, ohne dabei die mechanische Spannung selbst zu beeinflussen. Es wurden insgesamt zwei intern verfügbare Präparationsverfahren an einem Modelchip, welcher nur aus Silizium besteht, untersucht. Dabei handelt es sich um das mechanische Schleifen mit anschließendem Ionenpolieren und das Xenon-Plasma Focus Ion Beam (Xe-Plasma FIB). Beim Focus Ion Beam (FIB) war der Einfluss der verschiedenen Strahlströme des Ionenstrahls unterhalb der Nachweißgrenze des Raman-Spektrometers. Das Xe-Plasma-FIB eignet sich nur zum Entfernen von geringen Volumina, da es sehr zeitaufwendig ist. Erste Versuche an einem Indent auf einem Siliziumchip zeigen, dass sich auch bei verspannten Proben die mechanische Spannung nach der Präparation mit dem Xe-

Plasma-FIB nicht ändern. Für diese Untersuchung wurden in der Nähe einer Kante des Siliziumchips Indents gesetzt und mit der Raman-Spektroskopie auf der Chipoberfläche charakterisiert. Danach wurde mittels FIB mittig an die Indents heran präpariert und anschließend die mechanischen Spannungen mit Hilfe der Raman-Spektroskopie an der Chipseite bestimmt. Die Ergebnisse in der nachfolgenden Abbildung 164 beweisen, dass sich die Spannung durch den FIB-Schnitt nicht ändert. Betrachtet man die Bereiche vor (orange Pfeile) und hinter dem Indent (gelbe Pfeile), so sind die Peak-Verschiebungen in diesen Bereich vor und nach dem FIB gleich groß. Auch die nicht verspannten Bereiche (rote Pfeile) zeigen bei gleicher Skala eine gleiche Färbung und demnach auch die gleiche Peak-Verschiebung.

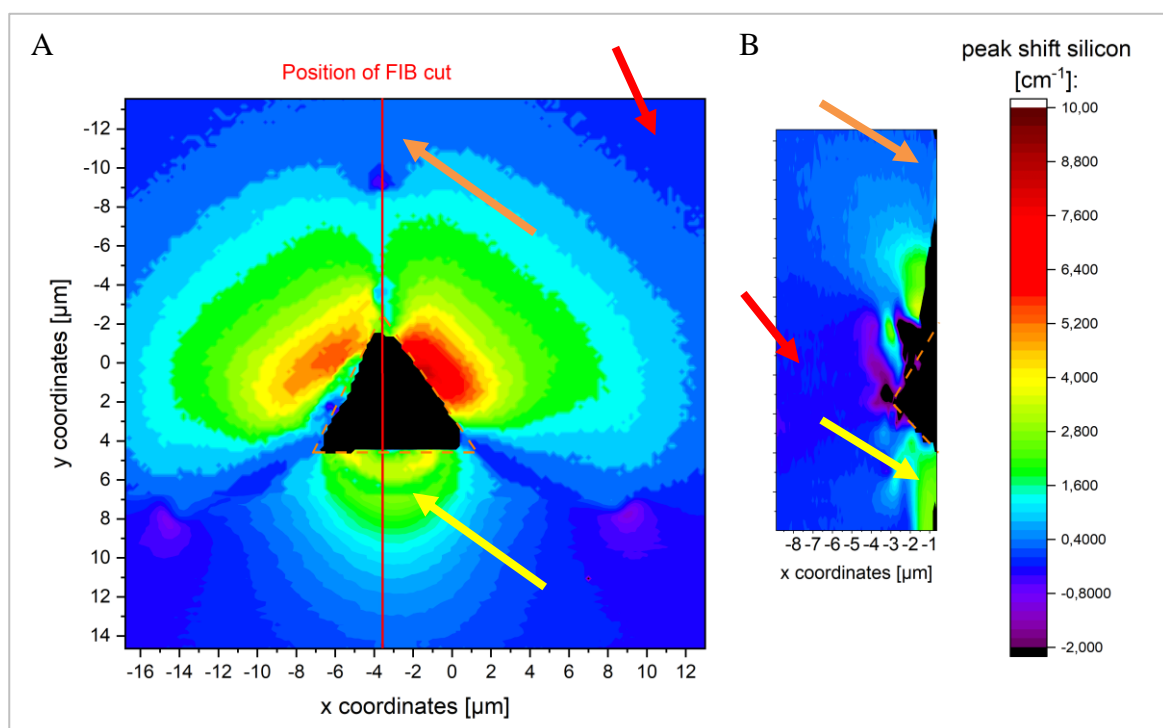


Abbildung 164: Raman-Messungen an einem Indent im Silizium; (A) auf der Chipoberfläche vor der Präparation mittels FIB und (B) auf der Chipseite nach der Präparation mit dem FIB

Bei der zweiten Präparationsmethode, dem mechanischen Schleifen, war der Einfluss auf die mechanische Spannung zunächst deutlich messbar. Das grobkörnige Schleifpapier beanspruchte den Silizium-Einkristall stark, so dass es zu Gitterdefekten kam. Die Siliziumoberfläche wies im Vergleich zum Chip vor der Präparation einen hohen Anteil an amorphen Silizium auf. Diese amorphen Bereiche wurden mit den anschließenden Schleifschritten entfernt und zusätzlich sank die mechanische Spannung wieder. Nach dem Ionenpolieren lag der messbare Einfluss der Präparation unterhalb der Nachweißgrenze des Raman-Spektrometers. Im Gegensatz zum FIB ist es mit dieser Methode möglich große Volumina in vergleichsweise kurzer Zeit zu entfernen. Die Messungen haben jedoch auch

gezeigt, dass man darauf achten muss, dass durch den ersten Schleifschritt keine zu tiefen Kratzer in die Oberfläche eingebracht werden, da diese auch nach dem Ionenpolieren als Präparationsartefakte zurückbleiben. In einem zusätzlichen Experiment wurde Mold Compound mittels mechanischen Schleifens entfernt. Nach jedem Dekapsulierschritt wurde der Einfluss mit der piezo-resistiver Messmethode überprüft. Das Ergebnis aus diesem Experiment zeigt, dass die mechanische Spannung durch das Entfernen des Mold Compounds beeinflusst wird. Diese Methode ist also nur begrenzt für die Präparation von Proben für die Raman-Spektroskopie geeignet. Bei der Präparation von gemoldeten Siliziumchips muss bei der anschließenden Messung der mechanischen Spannung mit dem Raman-Spektrometer darauf geachtet werden, dass die berechnete mechanische Spannung durch einen Faktor korrigiert wird. Bei der Präparation von nicht gemoldeten Siliziumchips kann das mechanische Schleifen durchaus dazu verwendet werden, den für die Raman-Messung interessanten Bereich frei zu legen. Dies haben die Raman-Messungen unterhalb der Bumps nach dem Wirebond-Prozess gezeigt.

Eine weitere Präparationsmethode war notwendig, um die einzelnen Spannungsmesschips überhaupt mit dem Raman-Spektrometer messen zu können. Die Passivierung in Form von Imid auf der Chipoberfläche absorbiert einen Großteil der Intensität des Lasers, so dass kein Signal mehr von der Chipoberfläche gemessen werden kann. Zum Entfernen des Imids wurde ein Plasmaätzverfahren verwendet. Der Einfluss auf die mechanische Spannung durch das Entfernen des Imids wurde mit Hilfe der piezo-resistiven Messmethode bestimmt. Das Ergebnis zeigt, dass dieses Verfahren zum Entfernen der Passivierung keinen messbaren Einfluss auf die mechanische Spannung hat und somit sehr gut als Präparationsmethode geeignet ist.

Vergleich der Finite Elemente Simulation mit den Experimenten aus dieser Arbeit

Bereits beim Vergleich der Ergebnisse von der Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven elektrischen Messmethode ist aufgefallen, dass der Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die mechanische Spannung bei den jeweiligen Methoden sehr unterschiedlich ist. Zur Bestätigung der Vermutung, dass die Metallisierungen in der Nähe der Raman-Messpunkte das gemessene Siliziumsignal beeinflussen, wurden für den Vergleich der beiden Messmethoden mit der Simulation nur die Raman-Messpunkte berücksichtigt, welche nicht in der Nähe von Metallisierungen liegen. Das reduzierte die Anzahl der Messpunkte zur Berechnung des Einflusses der Prozessschritte auf die mechanische Spannung auf 41 Messpunkte. Doch auch

dieser Vergleich zeigt keine eindeutige Übereinstimmung. So beträgt die mittlere Spannungsänderung auf der Chipoberfläche nach dem Die Attach gemessen mit der Raman-Spektroskopie 5 MPa und ist damit vergleichsweise klein. Im Vergleich zur Raman-Messung beträgt die mittlere Spannungsänderung von $\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$ nach dem Die Attach bei der piezo-resistiven elektrischen Messmethode 0,6 MPa. Nach dem Wirebond-Prozess steigt die mittlere Spannungsänderung der Raman-Messung auf 169 MPa und die mittlere Spannungsänderung von $\sigma_{xx} + \sigma_{yy}$ sinkt auf 0,4 MPa. Bei der Simulation änderte sich die mittlere mechanische Spannung auf der Chipoberfläche nach dem Die Attach um 41 MPa und nach dem Wirebond-Prozess nimmt die Spannung 25 MPa ab. Die Metallisierungen auf dem Chip sind demnach nicht der Grund für die Unterschiede zwischen den Messmethoden und der Simulation. Sowohl die Raman-Messungen als auch die piezo-resistiven elektrischen Messungen an den Spannungsmesschips im Grundzustand zeigen, dass diese bereits mechanische Spannungen besitzen. Die im Grundzustand gemessenen mechanischen Spannungen kommen durch das Prozessieren der Chips und den drei Metalllagen, welche sich auf den Chips befinden, zustande. Der Vergleich der Raman-Messung mit der Simulation an der Chipseite bestätigt den Einfluss der Metallisierung auf der Chipoberfläche, denn an der Chipseite stimmen sowohl die Spannungswerte als auch der Spannungsverlauf für den Die Attach und den Wirebond-Prozess überein. Beim Mold-Prozess gibt es jedoch Unterschiede bis zu 100 MPa, welche durch das Entfernen des Mold Compounds zustande kommen. Dies zeigt die Simulation des Schleifprozesses, bei welchem die Chipseite für die Raman-Messungen freigelegt wurde. Vergleicht man die mittlere mechanische Spannung an der Chipseite vor dem Dekapsulieren mit der mittleren mechanischen Spannung nach dem Entfernen, so ist die Differenz bis zu 98 MPa groß (σ_{xx}). Der Unterschied bei der Auswertung des Einflusses des Mold-Prozesses zwischen den Raman-Messungen und der Simulation beträgt bis zu 100 MPa. Um den Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung an der Chipseite bei der Raman-Messung am gemoldeten Chip heraus zu rechnen, könnte man die Spannungsdifferenz vor und nach dem Dekapsulieren aus der Simulation als Korrekturfaktor verwenden. Extrahiert man die mechanische Spannung an den einzelnen Messpunkten aus der Simulation und addiert diese dann zu der Raman-Messung hinzu, so erhält man Spannungswerte, die der Simulation sehr ähnlich sind.

Um das zusätzlich zu bestätigen, könnte man entweder in der Simulation die drei Metalllagen in das Model mitaufnehmen oder einen reinen Siliziumchip aufbauen. Der Nachteil des Aufbaus des reinen Siliziumchips wäre allerdings, dass man diesen nicht mit der piezo-resistiven elektrischen Methode auslesen kann.

Wahl der Methode zum partiellen Dekapsulierens

Bei der Auswertung der Ergebnisse aus den piezo-resistiven Messungen, welche nicht prozessbegleitend durchgeführt wurde, ist zu erkennen, wie sich die Spannung in X- und Y-Richtung nach den einzelnen Prozessen ändert. Der Verlauf zeigt im Vergleich zu den Raman-Messungen ein leicht anderes Bild. Im Gegensatz zu den Raman-Messungen, bei welchen die Spannungsänderung nach dem Die Attach sehr gering und nach dem Wirebond-Prozess sehr groß war, ist die Spannungsänderung gemessen mit der piezo-resistiver elektrischen Methode nach dem Die Attach groß und nach dem Wirebond-Prozess kaum messbar. Scheinbar ist die Änderung der Spannung nach dem Wirebond-Prozess durch das Herabsinken der Steifigkeit des Die Attach während des Wirebond-Prozesses aufgrund von Prozesstemperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur nicht messbar. Demzufolge scheint die Raman-Messung viel sensitiver für die Änderung der mechanischen Spannung während des Chip-Aufbaus zu sein. Der Vorteil der piezo-resistiven elektrischen Messung gegenüber der Raman-Messung ist die Möglichkeit, die Tensoren der mechanischen Spannung zu bestimmen und darzustellen. Dies wäre beim Raman-Spektrometer nur mit zusätzlichen Polarisatoren und auch nur bei höheren Spannungen möglich.

Dass der Vergleich der Mittelwerte der mechanischen Spannung von unterschiedlichen Spannungsmesschips aus unterschiedlichen Prozessschritten durchaus seine Gültigkeit hat, zeigt der Vergleich mit dem Experiment, bei welchem die Chips prozessbegleitend gemessen wurden. Der Vergleich einzelner Positionen bei unterschiedlichen Prozessen ist jedoch nur möglich, wenn man ein und denselben Chip nach jedem Prozessschritt misst, da die Varianz über die unterschiedlichen Spannungsmesschips (Kapitel 3.4.2. „Messsystem Spannungsmesschip“) zu groß ist.

Dieser Vergleich (Abbildungen 105 und 106) zeigt, dass die Spannungswerte in X-Richtung nach dem Die Attach-Prozess im Mittel um $2,37 \text{ MPa} \pm 0,6 \text{ MPa}$ größer werden und nach dem Wirebond-Prozess in X-Richtung um $1,33 \text{ MPa} \pm 1,04 \text{ MPa}$ kleiner werden. In Y-Richtung verhalten sich die Spannungen entgegengesetzt zur X-Richtung. Nach dem Die Attach-Prozess sinkt die Spannung erst um $2,37 \text{ MPa} \pm 0,94 \text{ MPa}$ und steigt dann nach dem Wirebond-Prozess wieder um $1,26 \text{ MPa} \pm 0,85 \text{ MPa}$ an. Begründet durch den piezo-resistiven Effekt ändert sich die mechanische Spannung in X-Richtung um den gleichen Wert wie in Y-Richtung, nur mit umgekehrtem Vorzeichen.

Der Vergleich des Einflusses der einzelnen Prozessschritte auf die mechanische Spannung im jeweiligen Chip zeigt, dass der Einfluss auf die mechanische Spannung in X- und in Y-Richtung des Die Attach größer ist als der Einfluss des Wirebond-Prozesses (Abbildung 105 und 106 im Kapitel 3.5.2. „Aufbau eines Modellchips“). Auch in den Abbildungen 109 bis 116 ist zu erkennen, dass sich die mechanische Spannung nach dem Die Attach mit -3 MPa bis 5 MPa in X-Richtung und im Zentrum des Chips beziehungsweise mit 1 MPa bis -7 MPa in Y-Richtung viel stärker ändert, als nach dem Wirebond-Prozess. Hierbei liegen die Änderungen der Spannung in X-Richtung im Bereich zwischen 0 MPa und -1,5 MPa beziehungsweise in einem Bereich von -0,5 MPa bis 2,5 MPa in Y-Richtung.

4.1.2. Grenzen der einzelnen Messmethoden

Die Ergebnisse und Vergleiche der einzelnen Experimente aus dieser Arbeit haben einige Grenzen der jeweiligen Methode hinsichtlich der Bestimmung der mechanischen Spannung aufgezeigt. So zeigte die Auswertung und der Vergleich der Ergebnisse aus den piezo-resistiven elektrischen Messungen und der Raman-Spektroskopie mit der Finite-Elemente-Simulation, dass die Simulation nur so gut ist wie das Modell. Demnach ist die Übereinstimmung der Simulation abhängig davon, wie gut das Modell der Simulation mit dem realen Experiment übereinstimmt.

Darüber hinaus wurde aus den verschiedenen Experimenten der Raman-Messungen deutlich, dass die Raman-Spektroskopie sehr sensitiv für Veränderungen im Kristall ist. Zusätzlich handelt es sich um ein optisches Verfahren, welches einen möglichst uneingeschränkten Zugang zu der Oberfläche benötigt, die gemessen werden soll. Dabei sind nicht nur Metallisierungen hinderlich, sondern auch Passivierungen wie beispielsweise Imid. Zusätzlich zeigen die Experimente, dass die Präparation das Ergebnis der Raman-Spektroskopie beeinflussen kann.

Der Spannungsmesschip ermöglicht die Bestimmung der mechanischen Spannung aus den elektrischen Messungen auf der Chipoberseite über die piezo-resistive Methode. Jedoch erhält man die Werte der mechanischen Spannung nur an den definierten Stellen, an denen sich auch die Transistoren für die elektrische Messung befinden. Es ist zwar möglich, den Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die mittlere mechanische Spannung auch ohne prozessbegleitende Messungen auf ein und demselben Spannungsmesschip zu bestimmen, allerdings muss für orts aufgelöste Aussagen über die mechanische Spannung ein und derselbe Chip nach jedem Prozess gemessen werden. Dazu sollte stets nur die Differenz zwischen den Messungen

betrachtet werden, da die mechanische Spannung auf dem Spannungsmesschip im Grundzustand bereits größer ist, als der Einfluss der Prozessschritte selbst. Zusätzlich muss für die Bestimmung der Spannungskomponenten σ_{xx} und σ_{yy} aus der Summen- und Differenzspannung darauf geachtet werden, dass die Temperatur während dieser Messung konstant ist, da die Summenspannung stark von der Temperatur abhängig ist.

4.2. Ausblick

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, gibt es einige Experimente, welche im Anschluss an dieser Arbeit durchgeführt werden können. So kann zum Beispiel die Informationstiefe der Raman-Spektroskopie von Galliumnitrid mit Hilfe eines Keils bestimmt werden. Darüber hinaus wäre es denkbar, eine sogenannte Kalibrierprobe herzustellen, welche unabhängig von der Wellenlänge des Lasers verwendet werden kann.

Ein weiteres Experiment könnte die Messzeit der mechanischen Spannung mittels Raman-Spektroskopie verkürzen, indem ein anderer Strahlteiler verwendet wird. Dieser Strahlteiler sollte mehr Intensität der Neon-Plasma-Quelle in den Strahlengang des zurückgestreuten Laserlichts transmittieren. Dadurch ist es möglich, die Messzeit zu verkürzen, da nun eine höhere Intensität der Neon-Plasma-Quelle auf dem Detektor ankommt. Bei den bisherigen Betrachtungen war es nicht möglich, die Zeit der Raman-Messung pro Punkt weiter zu verkürzen, da die Intensität des Neonpeaks so klein wurde, dass kein zuverlässiger Gauß-Lorenz-Fit dieses Peaks mehr möglich war. Dazu müsste sowohl der Einfluss der Laserleistung als auch der Einfluss der Messzeit auf die gemessene Peak-Verschiebung erneut untersucht werden.

Über die Dauer dieser Doktorarbeit wurde die 24 Stunden-Referenzmessung insgesamt acht Mal durchgeführt. Bei diesen acht Messungen kann untersucht werden, ob es möglich ist, die Dauer der Referenzmessung zu verkürzen. Stellt sich nämlich heraus, dass die Schwankung des Raman-Spektrometers nach beispielsweise 10 Stunden genauso groß ist wie nach 24 Stunden, kann so die Messzeit einer Referenzmessung auf 10 Stunden reduziert werden (Abbildung 165).

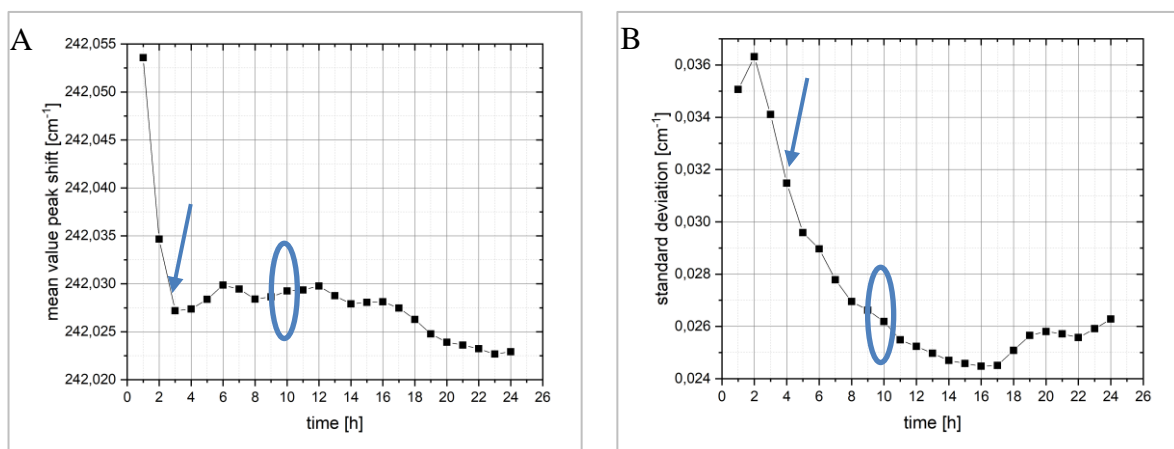


Abbildung 165: Auswertung der Mittelwerte (A) und der Standardabweichung (B) einer 24 h-Messung in Abhängigkeit der Zeit

So zeigt die Abbildung 165 (B), dass die Standardabweichung nach 10 Stunden genauso groß ist wie nach 24 Stunden. Die Abweichung des Mittelwerts bei 10 Stunden im Vergleich zum Mittelwert nach 24 Stunden beträgt lediglich $0,006 \text{ cm}^{-1}$. Demnach ist die Abweichung des Mittelwerts kleiner als die Standardabweichung. Berücksichtigt man die Standardabweichung bei der Betrachtung des Mittelwerts, so erkennt man, dass bereits nach drei Stunden der Unterschied zwischen dem Mittelwert nach dieser Zeit und dem Mittelwert nach 24 Stunden kleiner ist als die Standardabweichung. Der Unterschied der Mittelwerte beträgt $0,004 \text{ cm}^{-1}$ und die Standardabweichung nach drei Stunden liegt bei $0,03 \text{ cm}^{-1}$. Anhand der 24 h-Messung vom 29.03.2019 konnte also gezeigt werden, dass es durchaus möglich ist, die Messzeit zu verkürzen.

Um die Vergleichbarkeit zwischen der mechanischen Spannung gemessen mittels der Raman-Spektroskopie und der Simulation dieser Spannungen zu bestätigen, kann entweder das Simulationsmodell um Metallisierungen erweitert werden oder die mechanische Spannung noch einmal prozessbegleitend bei dem Aufbau eines reinen Siliziumchips durchgeführt werden, da zum Beispiel in (Chen , et al., 2005) die Ergebnisse der Raman-Spektroskopie mit der Simulation durchaus übereinstimmen. Eine weitere Möglichkeit die Vergleichbarkeit der Spannungswerte von Raman-Spektroskopie und piezo-resistiver elektrischer Messung zu bestätigen, ist die Verwendung von Interpolationsverfahren. Mit Hilfe dieser Verfahren sollen die fehlenden Werte beider Messmethoden ergänzt werden, da für die direkte Vergleichbarkeit beider Methoden meistens der entsprechende Messwert bei mindestens einer der beiden Methoden fehlt.

Verwendung von neuronalen Netzen für den Vergleich von Raman-Spektroskopie mit der piezo-resistiven elektrischen Messmethode

Beim Vergleich der Messungen der mechanischen Spannung auf dem Spannungsmesschip mittels Raman-Spektroskopie und der piezo-resistiven Methode fällt auf, dass die Spannungswerte an jeweils anderen Messpunkten liegen. Der Grund dafür sind die unterschiedlichen Koordinatensysteme beider Methoden. Die Messpunkte der mechanischen Spannungen bei der piezo-resistiven elektrischen Methode sind durch die Positionen der einzelnen Transistoren festgelegt. Dadurch entsteht ein Punkteraster von sechs auf zehn Messpunkten. Die Raman-Messungen liefern an diesen 60 Messpunkten wegen der Metallisierungen kein Signal. Demnach wurde versucht, die Messpunkte jeweils außen um die

Transistoren herum zu platzieren, sofern sich dort keine Metallisierungen befinden. Das Punkteraster der Raman-Messungen besitzt demnach 13 auf 22 Messpunkte. Im Idealfall sechs Messpunkte um einen Transistor herum, aus denen dann die mechanische Spannung dazwischen interpoliert werden kann, um beide Messverfahren miteinander vergleichen zu können.

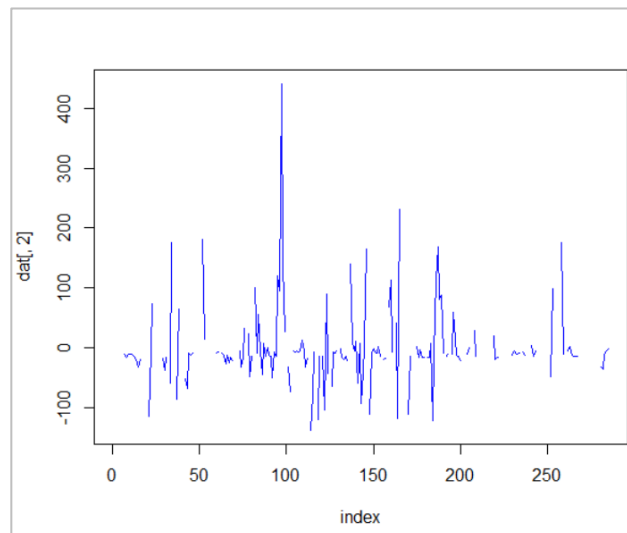


Abbildung 166: Abbildung der Peak-Verschiebung der einzelnen Raman-Messpunkte auf dem Spannungsmesschip

Für die Interpolation wurde ausgehend von den Raman-Messungen versucht, mit unterschiedlichen Verfahren die fehlenden Messpunkte zu bestimmen (Abbildung 166). Um die Interpolation zu vereinfachen, wurden die einzelnen Messpunkte nicht als Raster gesehen, sondern als Linie. Dadurch geht zwar zunächst die Ortsinformation durch die Nummerierung der Messpunkte verloren, kann aber später wiedergewonnen werden, da jedem Messpunkt eine Messposition auf dem Chip zugeordnet werden kann. Diese Auswertung entstand in Zusammenarbeit mit dem Kollegen David Dassler vom Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS).

Vorversuche

Die Abbildung 166 zeigt die Rohdaten einer Raman-Messung auf einem Spannungsmesschip. Die fehlenden Messpunkte sind die Positionen auf dem Chip, welche kein oder nur ein Raman-Signal mit schlechten Signal-Rausch-Verhältnis zeigen und somit keine zuverlässige Bestimmung der mechanischen Spannung in diesem Bereich möglich ist.

Die folgende Abbildung 167 zeigt eine Möglichkeit die fehlenden Messdaten zu interpolieren. Bei der sogenannten stochastischen Interpolation wird anhand der Verteilung der Daten aus einem Histogramm (Abbildung 167 (B)) versucht die fehlenden Datenpunkte zu ergänzen. Dafür wurde zunächst angenommen, dass die Messdaten der Raman-Messung normalverteilt sind. Es ist zu erkennen, dass die stochastische Interpolation die Datenpunkte gut ergänzt.

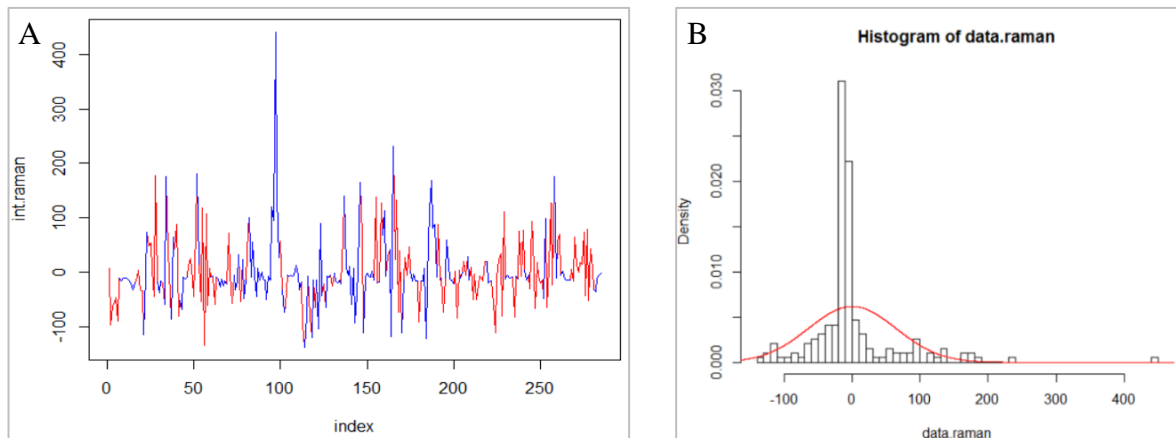


Abbildung 167: Stochastische Interpolation (A) mit Hilfe des Histogramms mit angenommener Normalverteilung (B) der fehlenden Messdaten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmessschip 10.1

Da es sich hier um eine statistische Methode handelt, um die fehlenden Messdaten zu erhalten, erhält man bei jeder Interpolation ein leicht anderes Ergebnis. Es muss also sichergestellt werden, dass auch nach der hundertsten Interpolation die fehlenden Werte der Raman-Messung gut ergänzt werden.

Mit Hilfe einer sogenannten Monte-Carlo-Simulation wurde die stochastische Interpolation automatisiert 100.000 Mal durchgeführt und anschließend daraus der Mittelwert gebildet. Das Ergebnis dieser Simulation ist Abbildung 168 zu sehen.

Es wird deutlich, dass der Mittelwert der 100.000 simulierten Interpolation zu einer Glättung führt. Der Grund dafür ist, dass bei jeder einzelnen Simulation immer leicht andere Werte interpoliert werden. Auffällig ist auch, dass in Bereichen, bei welchen die Anzahl der vorhandenen Messpunkte sehr gering ist, auch die stochastische Interpolation stärker von einer realistischen Messung abweicht. Deutlich wird das vor allem beim Vergleich des mittleren Bereichs (roter Kreis) mit dem Ende des Spektrums (blauer Kreis). In der Mitte sind die Peaks durch die stochastische Interpolation sehr gut zu erkennen. Am Ende des Spektrums hingegen sind nur noch wenig Peaks vorhanden und es wurden eher Werte interpoliert, welche auf einer geraden Linie liegen.

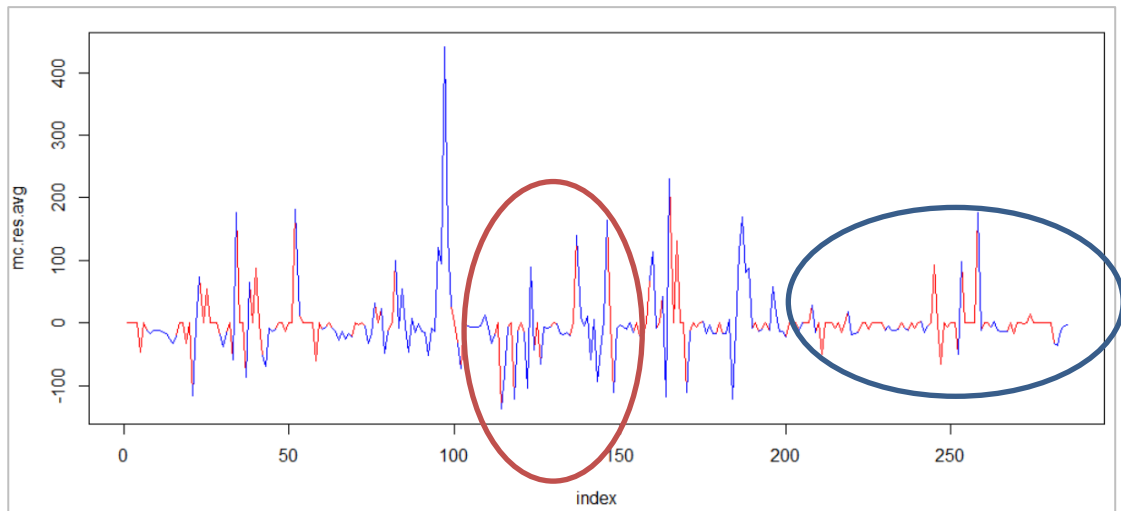


Abbildung 168: Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation von 100.000 stochastischen Interpolationen

Zusätzlich zu der stochastischen Interpolation wurden deterministische Verfahren versucht. Dazu gehört zum Beispiel die lineare Interpolation der Messwerte in Abbildung 169. Die lineare Interpolation zeigt keine gute Übereinstimmung, da bei dieser Art von Interpolation zwei benachbarte Messpunkte direkt miteinander verbunden werden.

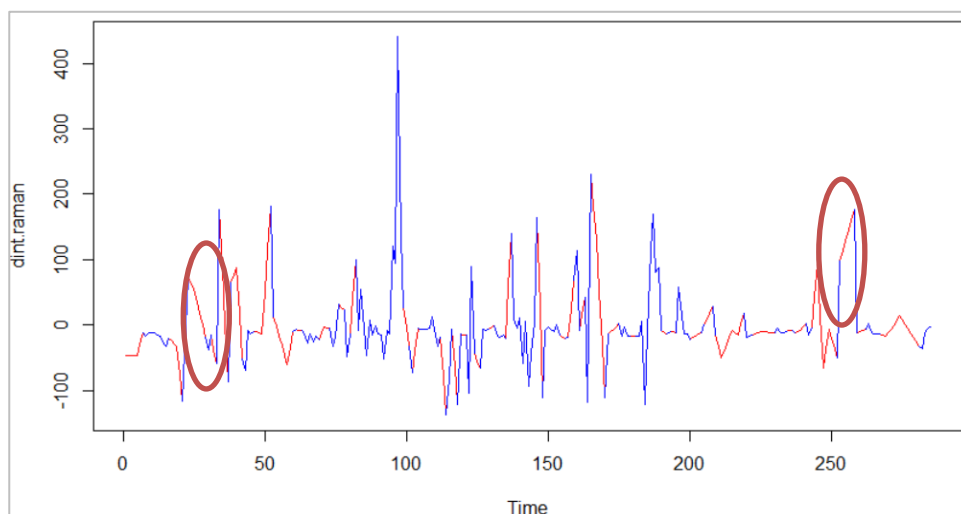


Abbildung 169: Ergebnis einer linearen Interpolation von fehlenden Messwerten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1

Das führt dazu, dass unter anderem manche Peaks sehr breit werden (rote Kreise in Abbildung 169). Breite Peaks sind jedoch untypisch für ein Messergebnis.

Als weiteres deterministisches Verfahren der Interpolation wurde die Kalman-Interpolation verwendet. Das Ergebnis dieser Interpolation ist in Abbildung 170 zu erkennen. Im Vergleich

zur linearen Interpolation stimmt die Kalman-Interpolation besser mit einem realen Datensatz überein.

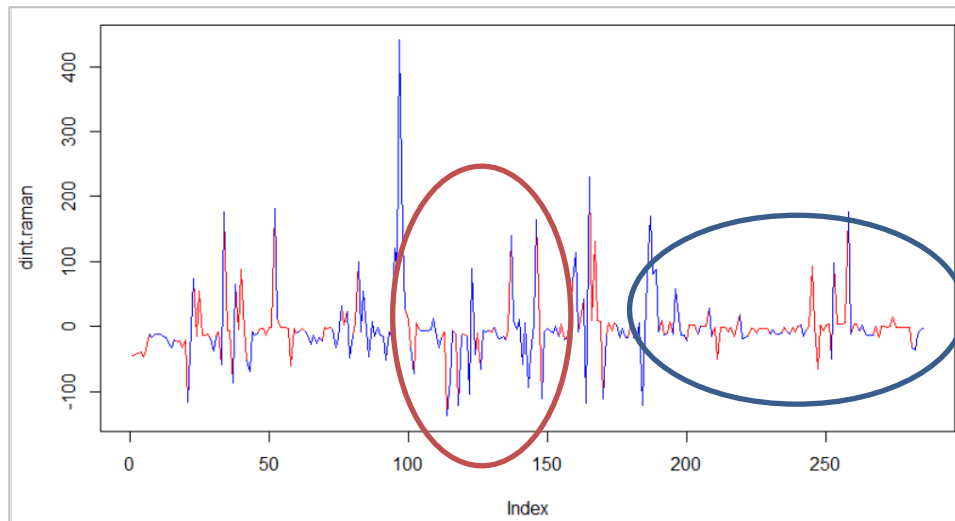


Abbildung 170: Ergebnis einer Kalman-Interpolation von fehlenden Messwerten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1

Jedoch zeigt die Kalman-Interpolation ähnlich wie die Mittelung von 100.000 stochastischen Interpolation (Abbildung 168), dass mit zunehmender Anzahl an hintereinander fehlenden Messwerten auch die Übereinstimmung mit einer realen Messung schlechter wird (blauer Kreis). Sind jedoch ausreichend Messpunkte für eine Interpolation vorhanden, stimmen die interpolierten Messpunkte sehr gut mit einem realen Datensatz überein.

Da die Annahme von normalverteilten Raman-Daten am Beispiel einer Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1 (Abbildung 167 (B)) keine gute Übereinstimmung mit einer realen Messung liefert, wurde als nächstes versucht eine geeignete Methode zu finden, um die Verteilung der Messpunkte möglichst gut zu beschreiben. Dazu wurde zunächst eine Weibull-Verteilung angenommen (Abbildung 171 (A)). Leider werden gerade die Ränder des Histogramms, genauso wie bei der Normalverteilung, nicht gut dargestellt. Letztendlich ist die Entscheidung auf eine empirische Verteilung gefallen (Abbildung 171 (B)), die sowohl die Daten in der Mitte des Histogramms als auch die Ränder des Histogramms gut abbildet.

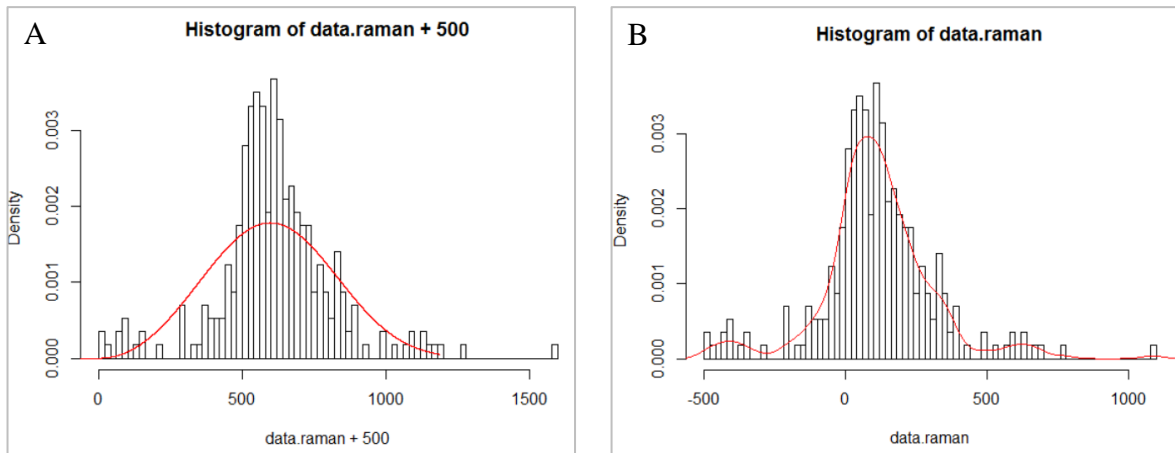


Abbildung 171: (A) Weibull-Verteilung und (B) Empirische-Verteilung

Mit Hilfe der empirischen Verteilung wurde nun noch einmal eine Monte-Carlo-Simulation mit stochastischen Interpolationen durchgeführt. Auch hier wurden 100.000 Durchläufe simuliert. Das Ergebnis dieser Monte-Carlo-Simulation ist in der folgenden Abbildung 172 zu sehen. Für eine bessere Einschätzung der Übereinstimmung eines Interpolationsverfahrens mit den gemessenen Raman-Daten, wurden dieses Mal an definierten Stellen Daten aus dem original Datensatz gelöscht und überprüft, wie gut diese gelöschten Daten interpoliert werden.

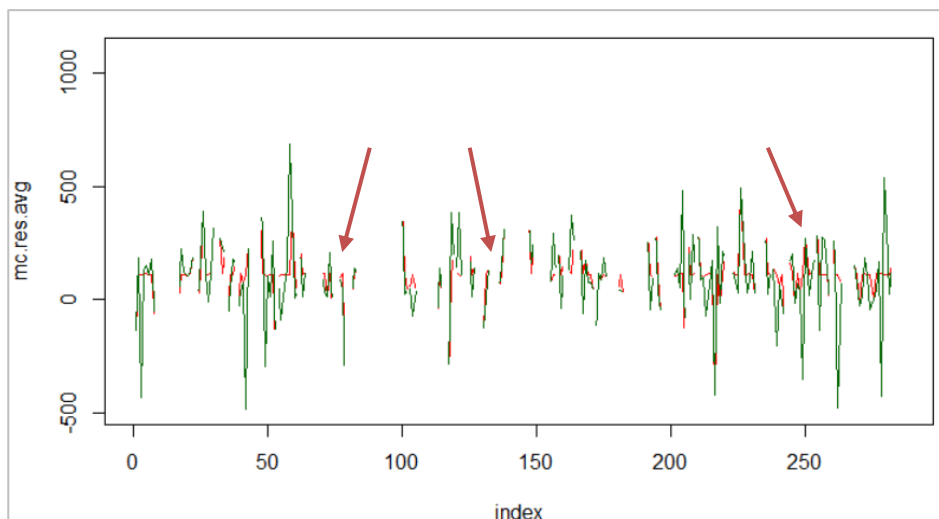


Abbildung 172: Vergleich des Ergebnisses der Monte-Carlo-Simulation von 100.000 stochastischen Interpolation mit empirischer Verteilung (rot) und dem gemessenen Datensatz (grün)

Die Abbildung 172 zeigt, dass es einzelne interpolierte Datenpunkte gibt, welche gut mit den gemessenen Daten übereinstimmen (rote Pfeile). Ein Großteil der interpolierten Messpunkte zeigt jedoch eine deutliche Abweichung zu den gemessenen Daten.

Verwendung eines Neuronales Netzes

Die Vorversuche haben gezeigt, dass es mit statistischen Methoden nicht möglich ist, fehlende Datenpunkte einer Raman-Messung zu interpolieren. Aus diesem Grund wurde versucht, die fehlenden Datenpunkte mit Hilfe eines neuronalen Netzes zu interpolieren. Die Abbildung 173 zeigt die schematische Darstellung eines solchen neuronalen Netzes.

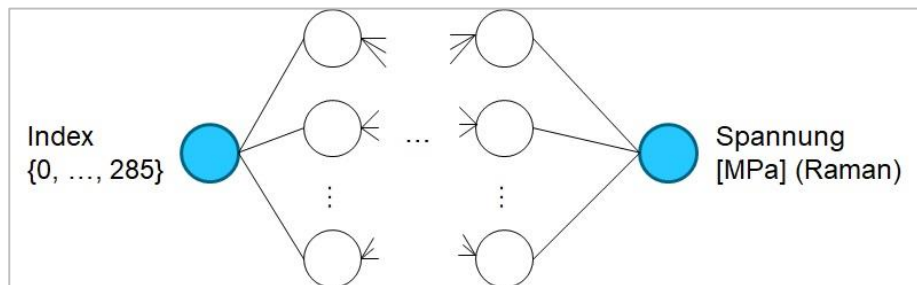


Abbildung 173: Schematische Darstellung eines neuronalen Netzes für die Interpolation fehlender Messpunkte

Die Idee hinter einem neuronalen Netz ist, dass man vollständige Datensätze generiert und diese als sogenannte Trainingsdatensätze verwendet. Anhand dieser Datensätze ist das neuronale Netz in der Lage, die Verteilung der Messpunkte zu studieren. Das neuronale Netz betrachtet, an welchen Positionen die Messwerte eher klein sind und an welchen Positionen Peaks durch höhere Messwerte entstehen. Je mehr Daten zum Trainieren verwendet werden, desto besser sind die Vorhersagen des neuronalen Netzes.

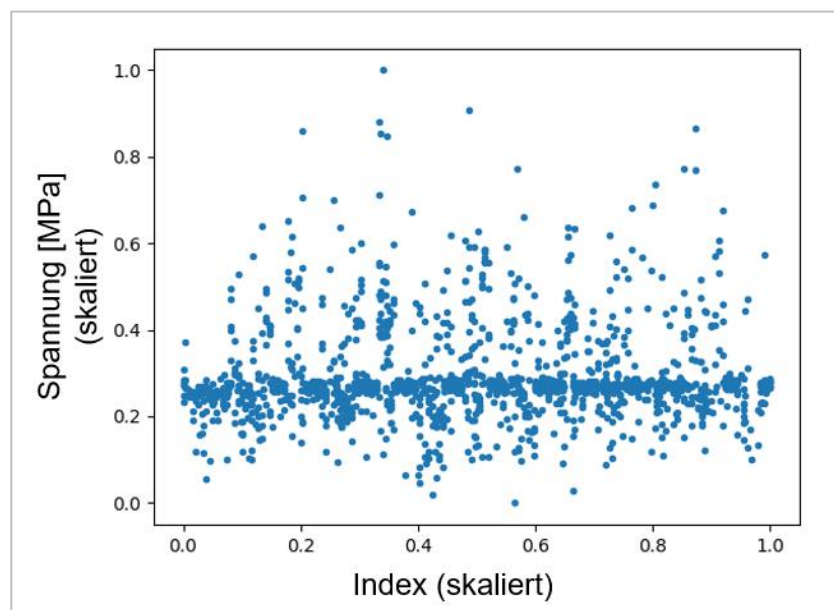


Abbildung 174: Darstellung eines skalierten Datensatzes aus einer hochauflösenden Raman-Messung für das Training des neuronalen Netzes

Ein Trainingsdatensatz besteht demnach aus skalierten Spannungswerten und dem dazu gehörigen skalierten Index. Als Trainingsdatensätze wurden hochaufgelöste Raman-Messungen verwendet (Abbildung 174). Eine solche Messung besteht aus insgesamt 19.980 Messpunkten. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt in X- und in Y-Richtung 16 μm .

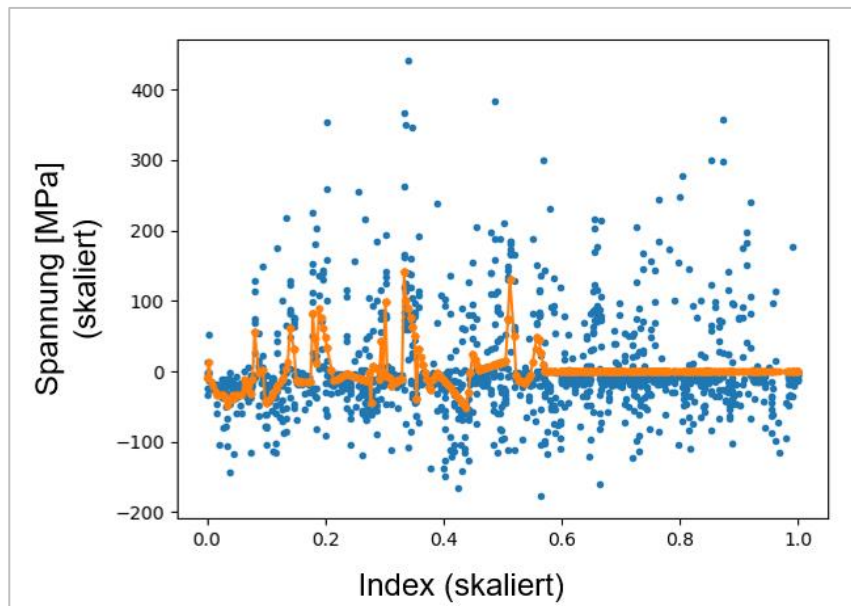


Abbildung 175: Ergebnis der Auswertung der hochaufgelösten Raman-Messungen durch das neuronale Netz

Die Abbildung 175 zeigt das Ergebnis der Interpretation der Raman-Messungen durch das neuronale Netz. Mit Hilfe dieser Interpretation kann nun versucht werden fehlende Daten zu interpolieren. Zum Testen des neuronalen Netzes wurden aus dem Trainingsdatensatz Datenpunkte gelöscht und überprüft wie gut diese fehlenden Daten von dem neuronalen Netz bestimmt werden.

Langfristig könnte dieses neuronale Netz so erweitert werden, dass es sich nicht nur auf das Interpolieren von Raman-Daten anwenden lässt, sondern auch durch das Trainieren mit zusätzlichen Daten beispielsweise zur Charakterisierung von unterschiedlichen Die Attach-Prozessen verwendet werden kann. Dazu könnten zusätzliche TMA- und DMA-Messwerte, Ergebnisse aus Nanoindentationsversuchen und Simulationsdaten herangezogen werden. Mit der Hilfe solch eines neuronalen Netzes könnte so das Verhalten des Die Attach bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen vorhergesagt werden.

Literaturverzeichnis

Adar, Fran. 2010. *Depth Resolution of the Raman Microscope: Optical Limitations and Sample Characteristic.* 2010.

Anastassakis, E. 1997. *Selection rules of Raman scattering by optical phonons in strained cubic crystals.* In: *Journal of Applied Physics [online]*. S. 1582-1591. Verfügbar unter: DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.365958>.

Anastassakis, E. 1990. *Strain Characterization of Semiconductor Structures and Superlattices.* In: *Light Scattering in Semiconductor Structures and Superlattice [online]*. S. 173-196. Verfügbar unter: DOI: [10.1007/978-1-4899-3695-0_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3695-0_13).

Anastassakis, E., et al. 1970. *EFFECT OF STATIC UNIAXIAL STRESS ON THE RAMAN SPECTRUM OF SILICON.* In: *Solid State Communications [online]*. S. 133-138 Verfügbar unter: DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(70\)90588-0](https://doi.org/10.1016/0038-1098(70)90588-0).

Bleisteiner, Bernd. 2009. *RAMAN - Instrumentation & Technology.* Bensheim: HORIBA, 2009.

Bond, Walter L. 1943. *The Mathematics of the Physical Properties of Crystals.* In: *The Bell System Technical Journal [online]*. S. 1-72. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1943.tb01304.x>.

Cerdeira, F., et al. 1972. *Stress-Induced Shifts of First-Order Raman Frequencies of Diamond- and Zinc-Blende-Type Semiconductors.* In: *Physical Review B [online]*. S. 580-593. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.5.580>.

Chandrasekhar, Meera, Renucci, j. B. and Cardona, M. 1978. *Effects of interband excitations on Raman photons in heavily doped n-Si.* In: *Physical Review B [online]*. S. 1623-1633. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.17.1623>.

Chen , Jian and De Wolf, Ingrid. 2005. *Theoretical and Experimental Raman Spectroscopy.* In: *Electrochemical and Solid-State Letters [online]*. S. 484-492. Verfügbar unter: DOI: [10.1149/1.1833666](https://doi.org/10.1149/1.1833666).

comScore. 2019. Anteil der Smartphone-Nutzer an allen Mobiltelefonbesitzern in ausgewählten europäischen Ländern im April 2016. *Statista - Das Statistik-Portal.* [Online]

April 28, 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/219258/umfrage/anteil-smartphonenuutzer-an-mobilfunknutzern/>.

De Wolf, I., et al. 1992. *MicroRaman study of stress distribution in local isolation structures and correlation with transmission electron microscopy.* In: Journal of Applied Physics [online]. S. 898-906. Verfügbar unter: DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.351311>.

De Wolf, Ingrid. 2015. *Relation between Raman frequency and triaxial stress in Si for surface and crosssectional experiments in microelectronics components.* In: Journal of Applied Physics [online]. S. 1-17. Verfügbar unter: DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4927133>.

De Wolf, Ingrid, et al. 1998. *Raman and Luminescence Spectroscopy for Mircoelectronics - Catalogue of optical and physical parameters "Nostradamus" project SMT4-CT-95-2024.* Luxembourg: EUROPEAN COMMISSION. ISBN: 92-828-5011-0.

De Wolf, Ingrid, et al. 1996. *Stress measurements in silicon devices through Raman spectroscopy: Bridging the gap between theory and experiment.* In Journal of Applied Physics [online]. S. 7148-7156. Verfügbar unter: DOI: <http://link.aip.org/link/doi/10.1063/1.361485>.

Dieing, Thomas, Hollricher, Olaf and Toporski, Jan. 2010. *SPRINGER SERIES IN OPTICAL SCIENCES 158 - Confocal Raman Microscopy.* Ulm: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-12521-8.

Dil, Jan G. and Brody, Edward M. 1976. *Brillouin scattering from isotropic metals.* In: Physical Review B [online]. S. 5218-5228. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.14.5218>.

Ganesan, S., Maradudin, A. A. and Oitmaa, J. 1970. *A Lattice Theory of Morphic Effects in Crystals of the Diamond Structure.* In: Annals of Physics [online]. S. 556-594. Verfügbar unter: DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(70\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0003-4916(70)90029-1).

Grellmann, Wolfgang and Seidler, Sabine. 2015. *Kunststoffprüfung.* München: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-42722-8.

Gross, Dietmar, et al. 2017. *Technische Mechanik 2 - Elastostatik.* Darmstadt, Essen, München: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-53678-0.

Hilleringmann, Ulrich. 2014. *Silizium-Halbleitertechnologie - Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik*. Paderborn: Springer Verlag. ISBN: 978-3-8348-13335-0.

ifD Allensbach. 2019. Ranking der wichtigsten Kaufkriterien in Deutschland bei der Neuanschaffung eines Handys oder Smartphones in den Jahren 2014 bis 2015. *Statista - Das Statistik-Portal*. [Online] April 28, 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168767/umfrage/kaufkriterien-bei-neuanschaffung-eines-handys-smartphones/>.

Iqbal, Z., et al. 1981. *RAMAN SCATTERING FROM SMALL PARTICLE SIZE POLYCRYSTALLINE SILICON*. In: *Solid State Communications* [online]. S. 993-996. Verfügbar unter: DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(81\)91202-3](https://doi.org/10.1016/0038-1098(81)91202-3).

Jaeger, Richard C., Ramani, Ramanathan and Suhling, Jeffrey C. 1995. *Effects of Stress-Induced Mismatches on CMOS Analog Circuits*. In *IEEE Xplore* [online]. S. 354-360. Verfügbar unter: DOI: 10.1109/VTSA.1995.524719.

Jansen, K. M. B. 2006. *Thermomechanical modelling and characterisation of polymers*. Delft: Mechanical Engineering and Marine Technology. Verfügbar unter: URL: https://www.researchgate.net/publication/331683452_Thermomechanical_modelling_and_characterisation_of_polymers_version.

Kittel, Dr. Hartmut, et al. 2008. *iForceSens- Entwicklung eines integrierten Stressmesssystems zur Quantifizierung der 3D Verformung von Sensorbauelementen in Abhängigkeit des Verpackungsprozesses (16SV1910-16SV1917)*. s.l.: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) [online]. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.2314/GBV:606643435>.

Klar, Heinrich and Noll, Tobias. 2015. *Integrierte Digitale Schaltungen - Vom Transistor zur optimierten Logikschaltung*. Berlin, Aachen: Springer Vieweg, ISBN: 978-3-540-40600-6.

Klein, Bernd. 2011. *FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen und Fahrzeugbau*. Kassel: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-8348-1603-0.

Melzer, Almut. 2018. Die Normalverteilung. *Six Sigma TC GmbH*, [Zugriff am: 30.12.2018.]. Verfügbar unter: URL: <https://www.6sigma-tc.de/de/six-sigma/grundlagen/six-sigma-normalverteilung/>.

Menard, Kevin Peter. 1999. *DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS - A Practical Introduction*. Boca Raton, Florida : CRC Press LLC. ISBN: 0-8493-8688-8.

Merkel, Markus and Öchsner, Andreas. 2014. *Eindimensionale Finite Elemente - Ein Einstieg in die Methode*. Hüttlingen, Southport (Australien): Springer Vieweg. ISBN: 978-3-642-54481-1.

Mikoshiha, Hiroaki. 1981. *STRESS-SENSITIVE PROPERTIES OF SILICON-GATE MOS DEVICES*. In: Solid-State Electronics [online]. S. 221-232. Verfügbar unter: DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90085-X).

Mohammed, Ahmed A.S., Moussa, Walied A. and Lou , Edmond. 2011. *High-Performance Piezoresistive MEMS Strain Sensor with Low Thermal Sensitivity*. In: Sensors (Basel) [online]. S. 1819-1846. Verfügbar unter: DOI: 10.3390/s110201819.

Nye, J. F. 1985. *Physical Properties of Crystals*. Oxford : CLARENDON PRESS OXFORD: ISBN: 0.12.851165-5.

Otting, Walter. 1952. *ANLEITUNG FÜR DIE CHEMISCHE LABORATORIUMSPRAXIS - DER RAMAN-EFFEKT UND SEINEN ANALYTISCHE ANWENDUNG*. Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-94587-8.

Pastewka, Lars, et al. 2009. *Surface amorphization, sputter rate, and intrinsic stresses of silicon during low energy Ga⁺ focused-ion beam milling*. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B [online]. S. 3072-3075. Verfügbar unter: DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2009.06.094>.

Pufall, Dr. Reinhard and De Wolf, Ingrid. 2012. *e-Brains: Best-Reliable Ambient Intelligent Nanosensor Systems by Heterogeneous Integration (ICT-257488)*. s.l.: European Community under the "Information Society Technologies".

Reisch, Michael Professor Dr. 2007. *Halbleiter-Bauelemente*. Kempten: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-73200-6.

Rost, Florian. 2013. *Charakterisierung des Stresschip-Messsystems (Masterarbeit)*. Berlin: Technische Universität Berlin.

Schindler-Saefkow, Florian, et al. 2013. *In-situ Characterization of Processes and Reliability of Embedded Packages With a Stress Chip* [PowerPoint-Präsentation]. Chemnitz: Fraunhofer ENAS, 11.11.2013.

Schubert, André. 2008. *Diplomarbeit: Elektrische Charakterisierung mechanischer Stresseffekte in Chip-Packages* (Diplomarbeit). Regensburg: Hochschule Regensburg - University of applied Sciences.

Shen, Y. R. and Bloembergen, N. 1965. *Theory of Stimulated Brillouin and Raman Scattering*. In: *Physical Review*. S. 1787-1805. Verfügbar unter: DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.137.A1787>.

Statistisches Bundesamt. 2019. Anteil der privaten Haushalte in Deutschland mit einem Mobiltelefon von 2000 bis 2018. *Statista - Das Statistik-Portal*. [Online] April 28, 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/198642/umfrage/anteil-der-haushalte-in-deutschland-mit-einem-mobiltelefon-seit-2000/>.

Stommel, Markus, Stojek, Marcus and Korte, Wolfgang. 2018. *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Dortmund, Bergisch Gladbach: Carl Hanser Verlag. ISBN: 978-3-446-45283-1.

Sze, S. M. and Ng, Kwok K. 2007. *PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES Third Edition*. Delhi: Wiley India. ISBN: 978-0-471-14323-9.

Wermelinger, Thomas. 2009. *Multi-Dimensional Investigation of Mechanical Stresses and Microstructure Evolution at Small Length-Scales Characterized and Visualized by Raman Microscopy* (Dissertation). Zurich: ETH Zurich., 2009. pp. 1-178.

ZSW. 2019. Weltweite Bestandsentwicklung von Elektroautos in den Jahren 2012 bis 2018. *Statista - Das Statistik-Portal*. [Online] April 28, 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen/>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Gitterstruktur (A) und der Kristallstruktur (B) von Silizium (Hilleringmann, 2013).....	4
Abbildung 2: Darstellung der Kristallebenen von Silizium mit den Miller'schen Indizes (Hilleringmann, 2013).....	4
Abbildung 3: Darstellung der unterschiedlichen Streu-Mechanismen von einem Photon mit einem Phonon (Wermelinger, 2009)	5
Abbildung 4: Auswahlregeln für Raman- und IR-aktive Materialien (Dieing, Hollricher, & Toporski, 2010)	9
Abbildung 5: Kristallkoordinatensystem bei einer [100]-orientierten Siliziumoberfläche (Pufall, et al., 2012).....	10
Abbildung 6: Mohr'scher Spannungskreis für den Fall, dass S_1 und S_2 positiv sind (Nye, 1985)	18
Abbildung 7: Änderung des Koordinatensystems zur Bestimmung der mechanischen Spannung aus der Peak-Verschiebung, welche auf einem Schlift gemessen wurde (Pufall, et al., 2012)	26
Abbildung 8: Darstellung der Regeln für die Berechnung der einzelnen Terme in der Matrix zum Bestimmen der Matrix zur Ermittlung der Dehnung und Spannung (Bond, 1943)	28
Abbildung 9: Mikroskopaufnahme des verwendeten Spannungsmesschips V1s	50
Abbildung 10: Detail-Aufnahme eines Strommessspiegels vom Spannungsmesschip	52
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Anordnung der Strommessspiegel (90°) (Kittel, et al., 2008).....	52
Abbildung 12: Darstellung der möglichen Ausrichtungen der Widerstände (Jaeger, et al., 1995)	54
Abbildung 13: Darstellung der Ausrichtung des Strommessspiegel für die einzelnen Kristallorientierungen (Schubert, 2008).....	63
Abbildung 14: Darstellung des Geometriemodells für die Simulation in ANSYS Classic	67
Abbildung 15: Darstellung des E-Moduls in Abhängigkeit von der Zeit [Dandong]	68
Abbildung 16: Darstellung des E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur [Dandong] ...	69
Abbildung 17: Darstellung des für die Simulation angenommenen Temperaturprofils	71
Abbildung 18: Graphische Darstellung der Fokustiefe und der Strahltaile (Bleistainer, 2009)	76
Abbildung 19: Intensität des Siliziumpeaks gemessen an verschiedenen Z-Positionen. Negative Z-Werte bedeuten, dass oberhalb der Probenoberfläche gemessen wurde und positive Z-Werte	

bedeuten, dass unterhalb der Probenoberfläche gemessen wurde. Die Probenoberfläche befindet sich bei $Z=0$	76
Abbildung 20: Darstellung der auf das Maximum normalisierten Amplitude des Siliziumpeaks bei unterschiedlichen „Hole“-Öffnungen in Abhängigkeit der Z-Position	77
Abbildung 21: Ergebnis der Weißlichtinterferometer-Messung; Übersichtsbild (A) und Höhenprofil der Siliziumschicht an der rot markierten Stelle (B)	79
Abbildung 22: Darstellung der gefitteten Peak-Amplitude über die verschiedenen Positionen des Linienscans	80
Abbildung 23: Bestimmung des Rauschsignals aus dem Mittelwert des Signals y_0 und der dreifachen Standardabweichung y_N für den linken Bereich.....	80
Abbildung 24: Bestimmung des Rauschsignals aus dem Mittelwert des Signals y_0 und der dreifachen Standardabweichung y_N für den rechten Bereich.....	80
Abbildung 25: Schematische Darstellung des angewendeten Strahlensatzes zur Bestimmung der Informationstiefe	82
Abbildung 26: Darstellung der Temperaturschwankungen im Raum und am Raman-Spektrometer über 24 h	84
Abbildung 27: Schwankungen des Siliziumpeaks ($520,6 \text{ cm}^{-1}$) und des Neonpeaks ($276,7 \text{ cm}^{-1}$) über 24 Stunden	85
Abbildung 28: Mittelwert (A) und Standardabweichung (B) des Mittelwerts über die drei Stunden bei den jeweiligen Leistungssprüngen (ND-Filter).....	87
Abbildung 29: Messaufbau zur Bestimmung des möglichen Temperatureintrags durch den Laser	88
Abbildung 30: Ergebnisse der Temperaturmessungen der verschiedenen Thermoelemente ..	89
Abbildung 31: Mittelwert (A) und Standardabweichung des Mittelwerts (B) über drei Stunden bei unterschiedlichen Messzeiten.....	91
Abbildung 32: Farbliche Darstellung der unterschiedlichen Peak-Breite in dem Messbereich aus der "LabSpec"-Software (Schleifprozess mit $30 \mu\text{m}$ Korngröße)	95
Abbildung 33: Umfärben aller nicht dunkelblauen Flächen für die Flächenanteilmessung in der „Piced“-Software (Schleifprozess mit $30 \mu\text{m}$ Korngröße)	96
Abbildung 34: Mittelwert und Standardabweichung der Raman-Verschiebung der kompletten Messfläche.....	97
Abbildung 35: Flächenanteil der größeren Kristallite (amorphe Bereiche) der kompletten Messfläche.....	97

Abbildung 36: Farblich kodierte Darstellung der Peak-Breite überlagert mit dem Videobild nach dem Ionenpolierschritt	97
Abbildung 37: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des treppenähnlichen FIB-Schliffs erstellt mit unterschiedlichen Strahlströmen (Frontansicht)	99
Abbildung 38: Rasterelektronenmikroskopaufnahme des treppenähnlichen FIB-Schliffs erstellt mit unterschiedlichen Strahlströmen (Draufsicht)	99
Abbildung 39: Mittelwerte mit Standardabweichungen der Messflächen auf den jeweiligen FIB-Schliffebenen; die rote durchgezogene Linie zeigt den Mittelwert auf dem Siliziumquerschliff mit der Standardabweichung (schwarze Linien) vor dem FIB-Schliff	99
Abbildung 40: Intensitätsmapping eines Spannungsmesschips (schwarze Bereiche liegen unterhalb der Nachweißgrenze x_D).....	102
Abbildung 41: Aus dem Intensitätsmapping abgeleitete Messpositionen für die prozessbegleitende Bestimmung der intrinsischen Spannung mittels Raman-Spektrometer	102
Abbildung 42: Vergleich der Mittelwerte der biaxialen Spannung der einzelnen Chips über die drei Prozessschritte.....	103
Abbildung 43: Ergebnis der DMA-Messung des verwendeten Die Attach (IFAG FE QM FA RBG 2 ETM).....	104
Abbildung 44: Ergebnis der TMA-Messung des verwendeten Die Attach (IFAG FE QM FA RBG 2 ETM).....	105
Abbildung 45: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 im Grundzustand	106
Abbildung 46: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 nach dem Die Attach	106
Abbildung 47: Biaxiale Spannung auf dem Spannungsmesschip 12.2 nach dem Wirebond-Prozess.....	107
Abbildung 48: Detaillierte Darstellung der Flecken auf dem Spannungsmesschip im Grundzustand(A), nach dem Die Attach (B) und nach dem Wirebond-Prozess (C)	107
Abbildung 49: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips im Grundzustand	108
Abbildung 50: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips nach dem Die Attach	109
Abbildung 51: Intensitätsmapping gemittelt über alle Spannungsmesschips nach dem Wirebond-Prozess	109
Abbildung 52: Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses vom Wirebond-Prozess um die vier gesetzten Bumps.....	110

Abbildung 53: Bestimmung des Einflusses des Wirebond-Prozesses auf die Spannung im Silizium nach dem Schliff.....	111
Abbildung 54: Peak-Verschiebung des Siliziums am Schliff nach dem Wirebond-Prozess .	113
Abbildung 55: Uniaxiale Spannungen am Interface nach dem Die Attach-Prozess.....	114
Abbildung 56: Uniaxiale Spannung am Interface nach dem Wirebond-Prozess.....	114
Abbildung 57: Überlagerung der beiden Histogramme von den Spannungswerten der Raman-Messungen an den Schliffen nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess.....	115
Abbildung 58: Mittels Raman-Spektroskopie bestimmte Spannungen an zwei Spannungsmesschips D1 (A) und D2 (B) nach dem Mold-Prozess.....	116
Abbildung 59: Ergebnis der Oberflächenanalyse mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)	119
Abbildung 60: Linienscan über die Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS).....	119
Abbildung 61: Ergebnis der Raman-Messung am partiell dekapsulierten Chip mit 24 gefrästen Löchern.....	120
Abbildung 62: Ergebnis der Oberflächenanalyse mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)	121
Abbildung 63: Linienscan über die Oberfläche mittels Weißlichtinterferometrie (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS).....	121
Abbildung 64: Ergebnis der Raman-Messung am partiell dekapsulierten Chip mit sechs gefrästen Löchern.....	122
Abbildung 65: Ergebnisse der Temperaturmessung über 24 Stunden in und um den Nadeltester bei geschlossener Tür (A) und detaillierter 30-Minuten-Ausschnitt (B)	123
Abbildung 66: Mikroskopbild eines Spannungsmesschips mit den vier markierten Kontaktpads und den beiden weiß markierten Transistoren 51 und 52	124
Abbildung 67: Differenz der Spannungen in X-Richtung zwischen der kleinsten Eindruckkraft und der höchstmöglich Eindruckkraft	125
Abbildung 68: Differenz der Spannungen in Y-Richtung zwischen der kleinsten Eindruckkraft und der höchstmöglich Eindruckkraft	125
Abbildung 69: Änderung der Spannung von Transistor 51 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft.....	126
Abbildung 70: Änderung der Spannung von Transistor 51 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft.....	126

Abbildung 71: Änderung der Spannung von Transistor 52 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft.....	127
Abbildung 72: Änderung der Spannung von Transistor 52 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft.....	127
Abbildung 73: Änderung der Spannung von Transistor 51 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung	127
Abbildung 74: Änderung der Spannung von Transistor 51 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung	127
Abbildung 75: Änderung der Spannung von Transistor 52 in X-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung	128
Abbildung 76: Änderung der Spannung von Transistor 52 in Y-Richtung mit steigender Eindruckkraft beim Kontaktieren ausschließlich in Y-Richtung	128
Abbildung 77: Differenz der gemessenen Spannungen in X-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 19.....	129
Abbildung 78: Differenz der gemessenen Spannungen in Y-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 19.....	129
Abbildung 79: Differenz der gemessenen Spannungen in X-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 20.....	130
Abbildung 80: Differenz der gemessenen Spannungen in Y-Richtung vor und nach der Indentation an den jeweiligen Transistoren auf Chip 20.....	130
Abbildung 81: Vergleich der Standardabweichungen bei zehn Messungen auf dem gleichen Chip	131
Abbildung 82: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus des Biegeversuchs	133
Abbildung 83: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} gemessen bei verschiedenen Druckeinstellungen im Vergleich zur Referenzmessung; Zusätzlich dargestellt sind die Unterschiede in den Differenzen an markanten Punkten	133
Abbildung 84: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} gemessen bei unterschiedlichen Druckeinstellungen im Vergleich zur Referenzmessung; Zusätzlich dargestellt sind die Unterschiede in den Differenzen an markanten Punkten	134
Abbildung 85: Darstellung der Spannungen in X-Richtung der fünf Spannungsmesschips, welche sich auf dem Trägerwafer befinden	136
Abbildung 86: Darstellung der Spannungen in Y-Richtung der fünf Spannungsmesschips, welche sich auf dem Trägerwafer befinden	137

Abbildung 87: Einfluss der Waferbiegung auf den oberen Spannungsmesschip SMCH1 in X-Richtung	138
Abbildung 88: Einfluss der Waferbiegung auf den oberen Spannungsmesschip SMCV1 in X-Richtung	139
Abbildung 89: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV13 in X-Richtung	139
Abbildung 90: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in X-Richtung	140
Abbildung 91: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH9 in X-Richtung	141
Abbildung 92: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH5 in Y-Richtung	142
Abbildung 93: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV1 in Y-Richtung	142
Abbildung 94: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCV13 in Y-Richtung	143
Abbildung 95: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in Y-Richtung	144
Abbildung 96: Einfluss der Waferbiegung auf den unteren Spannungsmesschip SMCH1 in Y-Richtung	145
Abbildung 97: Experimentell bestimmte Nummerierung der Transistoren auf dem Spannungsmesschip	147
Abbildung 98: Darstellung der Differenz der mechanischen Spannung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Drücke von ausgewählten Transistoren auf dem Spannungsmesschip.....	148
Abbildung 99: Differenz der Spannungstensoren σ_{xx} vor und nach dem Plasmaätzen.....	149
Abbildung 100: Differenz der Spannungstensoren σ_{yy} vor und nach dem Plasmaätzen.....	149
Abbildung 101: Mikroskopbild bei 30-facher Vergrößerung der Silberkontakte auf dem Leadframe vor dem Ar-Plasmareinigen	150
Abbildung 102: Mikroskopbild bei 32-facher Vergrößerung der Silberkontakte auf dem Leadframe nach dem Ar-Plasmareinigen	150
Abbildung 103: Differenzspannung σ_{xx} vor und nach dem Ar-Plasmaätzschritt.....	151
Abbildung 104: Differenzspannung σ_{yy} vor und nach dem Ar-Plasmaätzschritt.....	151
Abbildung 105: Mechanische Spannung gemittelt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte.....	152

Abbildung 106: Mittelwerte der Spannungsänderung zum jeweils vorherigen Prozessschritt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte.....	154
Abbildung 107: Änderung der Spannungskomponente σ_{xx} nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess	156
Abbildung 108: Änderung der Spannungskomponente σ_{yy} nach dem Die Attach und nach dem Wirebond-Prozess	156
Abbildung 109: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 12_2.....	158
Abbildung 110: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 12_2.....	159
Abbildung 111: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 12_2.....	160
Abbildung 112: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 12_2.....	161
Abbildung 113: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 16_2.....	161
Abbildung 114: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in X-Richtung im Chip 16_2.....	162
Abbildung 115: Einfluss des Prozessschritts Die Attach auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 16_2.....	163
Abbildung 116: Einfluss des Prozessschritts Wirebonding auf die intrinsische mechanische Spannung in Y-Richtung im Chip 16_2.....	164
Abbildung 117: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die Spannungskomponente σ_{xx} bei den einzelnen Transistorspiegeln auf dem jeweiligen Chip.....	165
Abbildung 118: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die Spannungskomponente σ_{yy} bei den einzelnen Transistorspiegeln auf dem jeweiligen Chip.....	165
Abbildung 119: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D1 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen	167
Abbildung 120: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D1 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen	168

Abbildung 121: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in X-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D2 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen	169
Abbildung 122: Einfluss des Dekapsulierens auf die mechanische Spannung in Y-Richtung, um die Raman-Messungen auf dem Spannungsmesschip D2 auf einer Schliifffläche zu ermöglichen	169
Abbildung 123: X-Ray-Tomografieaufnahme der Schichtdicke des Mold Compounds nach dem ersten Laserdekapsulierschritt (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)	170
Abbildung 124: X-Ray-Tomografieaufnahme der Schichtdicke des Mold Compounds nach dem neunten Laserdekapsulierschritt (IFAG FE QM FA RBG 2 PAS)	170
Abbildung 125: Spannungsänderung in X- und in Y-Richtung bei den einzelnen Dekapsulierschritten.....	171
Abbildung 126: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} zwischen ursprünglicher intrinsischer Spannung und der Spannung nach dem achten Dekapsulierschritt.....	173
Abbildung 127: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} zwischen ursprünglicher intrinsischer Spannung und der Spannung nach dem achten Dekapsulierschritt.....	174
Abbildung 128: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	175
Abbildung 129: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	176
Abbildung 130: 3D-Flächendiagramm der Spannungen in X-Richtung vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	177
Abbildung 131: 3D-Flächendiagramm der Spannungen in Y-Richtung vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	177
Abbildung 132: Differenz der Spannungskomponente σ_{xx} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	178
Abbildung 133: Differenz der Spannungskomponente σ_{yy} vor und nach dem partiellen Dekapsulieren.....	179
Abbildung 134: Vergleich der Histogramme von der Spannung in X-Richtung bei 6 und 24 gefrästen Löchern.....	180
Abbildung 135: Vergleich der Histogramme von der Spannung in Y-Richtung bei 6 und 24 gefrästen Löchern.....	180
Abbildung 136: Mechanische Spannungen auf der Chipoberfläche in X- (links) und Y-Richtung (rechts) der einzelnen Prozessschritte	182

Abbildung 137: Mechanische Spannungen auf der Chipseite (XZ-Ebene) in X- (links) und Y-Richtung (rechts) der einzelnen Prozessschritte.....	183
Abbildung 138: Ergebnisse der Raman-Messungen aus Kapitel 3.3.3. „Partielle Dekapsulierung	185
Abbildung 139: Einfluss des Die Attach-Prozesses auf die mechanische Spannung in X-Richtung (A) und in Y-Richtung (B) gemessen mit der piezo-resistiven Methode.....	188
Abbildung 140: Einfluss des Wirebond-Prozesses auf die mechanische Spannung in X-Richtung (A) und in Y-Richtung (B) gemessen mit der piezo-resistiven Methode.....	189
Abbildung 141: Änderung der mittleren mechanischen Spannung berechnet aus den in (B) gezeigten Punkten auf der Chipoberfläche in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte (A);	191
Abbildung 142: Mittelwerte der Spannungsänderung zum jeweils vorherigen Prozessschritt über den gesamten Chip in Abhängigkeit der einzelnen Prozessschritte.....	191
Abbildung 143: Vergleich der Mittelwerte der biaxialen Spannung der einzelnen Chips über die drei Prozessschritte.....	191
Abbildung 144: Einfluss des partiellen Dekapsulierens von oben auf die mechanische Spannung an der Chipoberfläche	193
Abbildung 145: Einfluss des partiellen Dekapsulierens von oben auf die mechanische Spannung an der langen Chipseite	194
Abbildung 146: Vergleich der Spannungsdifferenzen zwischen Simulation und piezo-resistiver Messung nach jedem Dekapsulierschritt von oben auf die Chipoberfläche	196
Abbildung 147: Oberflächenprofil eines Spannungsmesschips gemessen mittels Weißlichtinterferometrie und die Position der horizontalen Linie für das Höhenprofil	197
Abbildung 148: Oberflächenprofil eines Spannungsmesschips gemessen mittels Weißlichtinterferometrie und die Position der vertikalen Linie für das Höhenprofil	197
Abbildung 149: Beispiel für einen Parabel-Kurven-Fit (rot) ohne Berücksichtigung der Chipmetallisierung	198
Abbildung 150: Biegung in horizontaler Richtung (X-Richtung) jedes einzelnen Spannungsmesschips nach dem entsprechenden Prozessschritt	198
Abbildung 151: Biegung in vertikaler Richtung (Y-Richtung) jedes einzelnen Spannungsmesschips nach dem entsprechenden Prozessschritt	198
Abbildung 152: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach	200

Abbildung 153: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 16.2 nach dem Die Attach	200
Abbildung 154: Vergleich der Verbiegung vor und nach der Imid-Entfernung in horizontaler (A) und vertikaler (B) Richtung	201
Abbildung 155: Einfluss der Imid-Entfernung auf die Verbiegungsmessung mittels Weißlichtinterferometer am Beispiel eines Spannungsmesschips; (A), (C) Biegung vor dem Entfernen des Imids in horizontaler Richtung; (B), (D) Biegung nach dem Entfernen des Imids in horizontaler Richtung.....	202
Abbildung 156: Vertikales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach	203
Abbildung 157: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Die Attach	203
Abbildung 158: Mechanische Spannung in X-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Die Attach; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 144, an der das Höhenprofil gemessen wurde	204
Abbildung 159: Mechanische Spannung in Y-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Die Attach; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 145, an der das Höhenprofil gemessen wurde	204
Abbildung 160: Vertikales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Wirebond- Prozess.....	205
Abbildung 161: Horizontales Höhenprofil des Spannungsmesschips 12.2 nach dem Wirebond- Prozess.....	205
Abbildung 162: Mechanische Spannung in X-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Wirebonding; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 144, an der das Höhenprofil gemessen wurde	206
Abbildung 163: mechanische Spannung in Y-Richtung auf dem Chip 12_2 nach dem Prozessschritt Wirebonding; schwarze Linie in den Abbildungen entspricht der roten Linie aus Abbildung 145 an der das Höhenprofil gemessen wurde	206
Abbildung 164: Raman-Messungen an einem Indent im Silizium; (A) auf der Chipoberfläche vor der Präparation mittels FIB und (B) auf der Chipseite nach der Präparation mit dem FIB	226
Abbildung 165: Auswertung der Mittelwerte (A) und der Standardabweichung (B) einer 24 h- Messung in Abhängigkeit der Zeit	232

Abbildung 166: Abbildung der Peak-Verschiebung der einzelnen Raman-Messpunkte auf dem Spannungsmesschip	234
Abbildung 167: Stochastische Interpolation (A) mit Hilfe des Histogramms mit angenommener Normalverteilung (B) der fehlenden Messdaten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1	235
Abbildung 168: Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation von 100.000 stochastischen Interpolationen	236
Abbildung 169: Ergebnis einer linearen Interpolation von fehlenden Messwerten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1	236
Abbildung 170: Ergebnis einer Kalman-Interpolation von fehlenden Messwerten einer Raman-Messung auf dem Spannungsmesschip 10.1	237
Abbildung 171: (A) Weibull-Verteilung und (B) Empirische-Verteilung.....	238
Abbildung 172: Vergleich des Ergebnisses der Monte-Carlo-Simulation von 100.000 stochastischen Interpolation mit empirischer Verteilung (rot) und dem gemessenen Datensatz (grün).....	238
Abbildung 173: Schematische Darstellung eines neuronalen Netzes für die Interpolation fehlender Messpunkte	239
Abbildung 174: Darstellung eines skalierten Datensatzes aus einer hochaufgelösten Raman-Messung für das Training des neuronalen Netzes.....	239
Abbildung 175: Ergebnis der Auswertung der hochaufgelösten Raman-Messungen durch das neuronale Netz.....	240

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Matrix-Notation zum Ersetzen von zwei Indizes durch einen Index	16
Tabelle 2: Übersicht über die Regeln zur Verwendung der Faktoren 2 und 4.....	17
Tabelle 3: Zusammenfassung der Möglichkeiten, wie die Eigenvektoren des eingestrahnten und des reflektierten Laserlichtes zueinander liegen können und die daraus resultierenden sichtbaren Raman-Peaks	44
Tabelle 4: Berechnung der Winkelfunktionen aus der Formel [201] für bestimmte Winkel ..	54
Tabelle 5: Typische Werte für piezo-resistive Koeffizienten für leicht dotiertes Silizium	59
Tabelle 6: Bestimmung der Fokustiefe nach Formel [224] aus der Numerischen Apertur und der Wellenlänge des anregenden Lasers (Bleisteiner, 2009)	75
Tabelle 7: Ergebnisse der einzelnen Versuchsreihen zur Bestimmung der Informationstiefe im Silizium	81
Tabelle 8: Übersicht der experimentell bestimmten optimalen Messparameter für die Spannungsmessungen im Silizium.....	93
Tabelle 9: Übersicht der Messparameter für die Validierung der Intensität des Siliziumpeaks	93
Tabelle 10: Übersicht der Messparameter für die Validierung der Peak-Position des Silizium- und Neonpeaks	94
Tabelle 11: Übersicht der Parameter am Xe-Plasma-FIB	98
Tabelle 12: Vergleich der Schnittpunkte der eingezeichneten Kurve (Tendenz) mit den jeweiligen Datenmengen aus den unterschiedlichen Aufbausritten für die prozessbegleitende und nicht-prozessbegleitende Messreihe.....	155
Tabelle 13: Mittels X-Ray-Tomografie bestimmte Schichtdicke des Mold Compounds und die daraus berechnete abgetragene Dicke des Mold Compounds	171

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
h	Plank'sches Wirkungsquantum ($h=6,626 \text{ J/s}$)	J/s
ν_0	Grundfrequenz des Lichtes	1/s
μ	Dipolmoment des Moleküls	C*m
α	Polarisierbarkeit	C/m ²
E	elektrisches Feld	N/C
ω_0	Schwingungsfrequenz	1/s
t	Zeit	s
E_0	Schwingungsamplitude	
Q_0	Gleichgewicht des Moleküls	
q	Schwingungsmode	
Q	Summe aller Schwingungsmode	
σ	mechanische Spannung	MPa
I	Intensität des Lichts	W/m ²
$e^{\text{in}}/e^{\text{out}}$	Polarisationsvektor	
C	Konstante	
R	Phononen-Raman Tensor	
d	Elektrischer Feldvektor	
$K_{\alpha\beta}$	Kraftkonstante	N/m
η_β/η_α	karthesische Koordinaten des Eigenvektors	
$\delta_{\alpha\beta}$	Kronecker Delta	
λ	Wellenlänge	nm
ε	Dehnung	m
S	Nachgiebigkeit	m ² /N
S_{11}	Komponente des Nachgiebigkeitstensors ($7,68 \cdot 10^{-12}$)	m ² /N
S_{12}	Komponente des Nachgiebigkeitstensors ($-2,14 \cdot 10^{-12}$)	m ² /N
e	Einheitsvektor	
p	unabhängige Kraftkomponente für Silizium $-1,43 \cdot (\omega_0)^2$	
q	unabhängige Kraftkomponente für Silizium $-1,89 \cdot (\omega_0)^2$	
r	unabhängige Kraftkomponente für Silizium	
d	Proportionalitätskonstante	
f	elektrischer Feldvektor	
X_C, Y_C, Z_C	Koordinaten des Kristalls	
X_S, Y_S, Z_S	Koordinaten des Probensystems	
X_X, Y_X, Z_X	Koordinaten des Schliffes	
A_{Rot}	Rotationsmatrix	
$R_{\text{rot}}, R_{j,k}$	transponierte Rotationsmatrix	
T	kartesischer Tensor 2. Ordnung	
$D_{j,k}$	Platzhalter	
R	elektrischer Widerstand	Ω
\sin	Sinus	°/rad

Symbol	Bezeichnung	Einheit
cos	Cosinus	°/rad
π	piezo-resistive Koeffizienten	Pa ⁻¹
T	Temperatur	°C/K
α, θ	Winkel	°/rad
I _D	Driftstrom	A
μ	Ladungsträgermobilität	cm ² /V*S
C _{ox}	Oxidkapazität	F
L	Länge	$\mu\text{m}/\text{nm}$
W	Weite	$\mu\text{m}/\text{nm}$
U _{GS}	Gate-Source-Spannung	V
U _T	Einsatzspannung	V
U _{DS}	Drain-Source-Spannung	V
Φ_K	Kanalspannung, die von der Drain-Source-Spannung verursacht wird	V
ρ	spezifischer Widerstand	Ω^*m
N _A	Akzeptor-Konzentration	
d	Dicke des Widerstandes	$\mu\text{m}/\text{mm}$
E _V	Steifigkeit der Feder im Maxwell-Modell	
η	Viskosität eines viskosen Werstoffes	
τ	Relaxationszeit	s/min
E ₀	Steifigkeit des Thermoplastes	
D.O.F.	Fokustiefe	μm
NA	Numerische Apertur des Objektivs	
d _{IN}	Informationstiefe im Silizium	μm
d ₀	Schichtdicke Silizium	μm
x _{wedge}	Länge des Keils	μm
x _{Raman}	Länge des Linescans im Raman	μm

Danksagung

Eine Doktorarbeit schafft man nicht alleine! Es gibt immer Kollegen die einen auf die eine oder die andere Art und Weise unterstützen und somit solch eine Arbeit erst ermöglichen.

Als allererstes möchte ich mich bei meinem Chef Walter Mack bedanken, der vor mehr als drei Jahren den Mut hatte, mich aus dem weit entfernten Berlin zu einem Bewerbungsgespräch einzuladen und mir somit letzten Endes auch die Möglichkeit gegeben hat zu promovieren. Damit hat er nicht nur meinen beruflichen Weg geebnet, sondern auch privat einiges ins Rollen gebracht. Vielen vielen lieben Dank dafür Walter! Danke auch für das tolle Team an Kollegen, dass du zusammengestellt hast. Dieses Team hat mich von Anfang an sehr herzlich aufgenommen und jeder einzelne von ihnen hat mich immer unterstützt! Weiterhin hast du es mir ermöglicht auf Konferenzen zu fahren, auf welchen ich sehr wichtige Erfahrungen sammeln konnte und hatte so auch die einmalige Chance Ingrid de Wolf zu treffen, die sozusagen die Mutter der Spannungsmessungen mittels Raman-Spektroskopie ist.

Natürlich möchte ich mich auch bei meinen beiden betreuenden Professoren Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn und Prof. Dr. Matthias Petzold und ihren Mitarbeitern bedanken. Trotz der Entfernung habe ich mich sehr gut betreut gefühlt. Die Treffen mit Prof. Dr. Matthias Petzold waren jedes Mal sehr hilfreich und gerade zu Beginn meiner Doktorarbeit eine große Hilfe für mich in Hinblick auf die Fahrtrichtung dieser Arbeit. Das jährliche Doktorandenseminar hat die Präsentation neuer Ergebnisse und das Einholen von Hinweisen beziehungsweise konstruktiver Kritiken und Hilfestellungen auch von anderen Doktoranden und Professoren sehr vereinfacht. Zusätzlich hatte ich so die Möglichkeit, mich neben meinen Professoren auch mit anderen Doktoranden auszutauschen. Gerade am Anfang profitiert man sehr stark von den Erfahrungen der anderen älteren Doktoranden. Diese Doktorandenseminare sind meiner Meinung nach gerade für externe Doktoranden eine tolle Sache und eine sehr gute Möglichkeit die Meilensteine seiner eigenen Arbeit zu präsentieren.

Als nächstes möchte ich meinem Betreuer Holger Pfaff bei Infineon Danke sagen. Holger hat mich über die Jahre hinweg immer unterstützt und mir in den richtigen Momenten Hilfestellung gegeben. Für ihn gab es keinen Tag, an dem er nicht für da mich da gewesen wäre. Egal ob Wochenenden, Feiertage oder noch weit nach Feierabend und sicherlich auch die ein oder andere Nacht! Er war einfach immer für mich da! Holger, ich bin dir unendlich dankbar dafür und weiß, dass die Art und Weise, wie du mich betreut hast, nicht selbstverständlich ist. Ich bin

sehr froh, dass du weiterhin mein Kollege bist und freue mich sehr auf die weitere Zusammenarbeit mit dir.

Harald Preu war mein Pate für die ersten Monate bei Infineon. Er hat dafür gesorgt, dass ich einen sehr schnellen und angenehmen Start bei Infineon hatte. Darüber hinaus hat er auch in der Zeit nach der Startphase immer ein offenes Ohr für meine Fragen und Belange gehabt. Mit seinen kritischen Fragen hat er mich zum Nachdenken angeregt. Dies führte zwar fast immer zu Recherche-Hausaufgaben, dennoch waren die Erkenntnisse daraus immer sehr hilfreich und haben letzendes dafür gesorgt, dass ich mittlerweile selbst viele Problemstellungen kritisch hinterfrage. Vielen lieben Dank Harald für alles!

Einer der Kollegen, ohne den ein wichtiger Teil dieser Doktorarbeit nicht so schnell fertig geworden wäre, ist Markus Fink aus der Abteilung, welche sich mit Simulationen befasst. Er hat mir innerhalb kürzester Zeit den Umgang mit ANSYS Classic beigebracht und mir sehr bei der Modellierung meiner Experimente geholfen. Er hat in den vielen Terminen stets geduldig und sehr ausführlich meine Fragen zum Thema Simulation und Modellierung beantwortet. Ich bin dir wirklich von Herzen dankbar Markus! Ohne dich hätte ich die Arbeit niemals in dieser Zeit fertig stellen können.

Zusätzlich möchte ich mich bei meinen Fehleranalyse-Kollegen bedanken, welche mir mit zeitnahen Analysen, Präparationen und Wissen zu der jeweiligen Methode sehr weitergeholfen haben. Dazu gehören zum einen Sabine Weiss, Martina Schaffus und Leo Wolf, die immer sofort Zeit hatten, wenn ich eine X-Ray-Analyse gebraucht habe. Zum anderen Markus Graml für seine Unterstützung zum Thema Oberflächenprofilometrie mittels Weißlichtinterferometer und Fred Kroninger für das Laserdekapsulieren und das Entfernen von Imid. Nur dank diesen Kollegen konnte der prozessbegleitende Aufbau des Spannungsmesschips so schnell durchgeführt werden. Ich möchte mich auch bei Christian Hollerith für das Fräsen der Löcher mit der Mikrofräse und den dazugehörigen Experimenten bedanken. Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei Jürgen Walter bedanken. Er hat nicht nur die Probe am FIB für mich hergestellt, sondern mir auch sonst immer mit Rat und Tat zu Seite gestanden.

Ein weiterer Dank geht auch an Sebastian Wittmann und Patrick Hanekamp für das Durchführen der Reinigung der Leads mittels Plasmaätzen. Auch die nächsten beiden Kollegen haben ein großes Dankeschön verdient. Dr. Werner Breuer und Derek Debie haben mir als Leiter des InnoLabs bei Infineon nicht nur alles was ich zum Thema elektrisches Auslesen des

Spannungsmesschips mit dem Nadeltester wissen musste beigebracht, sondern waren darüber hinaus immer da, wenn es Fragen gab.

Außerdem möchte ich mich bei Michael Krause und seinem Kollegen Georg Schusser vom IMWS bedanken, die für mich Spannungsmesschips mittels Laser dekapsuliert haben.

Dass die Doktorandenseminare sehr hilfreich sind, zeigt auch die entstandene Zusammenarbeit mit dem Doktoranden David Dassler. Mit ihm zusammen und nach Anregung seitens Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn entstand die Idee, die Themen beider Promotionen zu verbinden. Ich möchte David für die gute Zusammenarbeit und die Zeit, die er in das Erstellen des neuronalen Netzes investierte hat herzlich danken.

Einer Person außerhalb von Infineon und dem IMWS, die mich zur Bewerbung bei Infineon ermutigt und mich dahingehend sehr unterstützt hat, möchte ich ebenfalls Danke sagen. Gunther Lippert war mein betrieblicher Betreuer während meiner Masterarbeit und danach als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Er hat mir sehr viel über das Erstellen und Durchführen von wissenschaftlichen Arbeiten beigebracht! Ich denke immer gerne an die Zeit mit dir und Hans zurück! Insbesondere unsere Gespräche und Diskussionen bei einer Tasse Tee haben mich stets weitergebracht!

Darüber hinaus möchte ich mich noch bei Ingrid De Wolf für die sehr aufschlussreichen Gespräche und die vielen Tipps bedanken, welche sie mir mitgegeben hat.

Der größte Dank geht an meine Familie, besonders an meine Frau Martina und meine Tochter Amilia. Gerade im letzten Jahr haben sie immer hinter mir gestanden und mich unterstützt, wo es nur ging und wenn es sein musste sich auch vor mich gestellt. Martina hat alles möglich gemacht, dass ich genügend Zeit finde meine Arbeit fertig zu schreiben und darüber hinaus auch immer Zeit gefunden meine Doktorarbeit Korrektur zu lesen. Das war sicher nicht immer einfach. Ich kann dir gar nicht genug dafür danken! Danke auch an meine Tochter Amilia, deren zauberhafte Art und Weise stets eine Motivation für mich war diese Doktorarbeit bestmöglich zu schreiben.

Angaben zur Person

Zur Person

Name: Tim Schaffus
Geboren am: 21. Juni 1989
Geburtsort: Frankfurt (Oder)

Akademischer Werdegang

12/2015 - derzeit Doktorarbeit bei Infineon Technologies AG, Regensburg
Thema: Untersuchung des Einflusses von Probenpräparationsverfahren auf die mechanische Spannung im Silizium mittels Raman-Spektrometer

04/2015 - 09/2015 Masterarbeit am Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP)
Thema: Abscheiden und Charakterisieren von Graphen auf nicht-metallischen Schichten

09/2013 - 09/2015 Studium Photonik (Master of Engineering) an der Technischen Hochschule Wildau
Note: 1,6

09/2010 - 09/2013 Studium Ingenieurwesen Physikalische Technik (Bachelor of Engineering) an der Technischen Hochschule Wildau
Note: 2,7

08/2002 - 06/2009 Städtisches Gymnasium Carl Friedrich Gauß, Frankfurt (Oder)
Leistungskurse: Physik, Biologie

(Unterschrift: Tim Schaffus)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Tim Schaffus, dass ich diese Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

_____, den _____

(Ort, Datum)

(Unterschrift: Tim Schaffus)