





Fraunhofer-Gesellschaft: Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP (Halle)

Hochschule Merseburg (FH) University of Applied Sciences

Studiengang Maschinenbau/Mechatronik/Physiktechnik (M.Eng.)

## **Masterarbeit**

**Erstellung eines FE-Modells zur Abbildung der transienten Temperaturverteilung  
beim Löten von Solarzellen**

Von

Marius Zimmermann

geboren am 11.11.1988

in Naumburg

Matrikelnummer: 18969

Verantwortlicher Betreuer Hochschule: Prof. Dr.-Ing. Rolf Kademann

Verantwortlicher Betreuer Fraunhofer CSP: M. Sc., M. Eng. Sascha Dietrich

Halle, Mai – September 2013

# Aufgabenstellung

## für die Masterarbeit (M.Eng.)

### von Herrn Marius Zimmermann

### (Matrikel 11MMIP)



Merseburg, 30.05.2013

**Thema:** Erstellung eines FE-Modells zur Abbildung der transienten Temperaturverteilung beim Lötten von Solarzellen

**Betreuer:** Prof. Dr.-Ing. Rolf Kademann Hochschule Merseburg  
M.Sc. M.Eng. Sascha Dietrich Fraunhofer-Center für Silizium Photovoltaik CSP

## Aufgabenstellung

Photovoltaikmodule bestehen aus verschiedenen Komponenten mit unterschiedlichsten Materialien. Sämtliche Komponenten werden in mehreren Prozessschritten (z.B. Lötten, Vakuumlamination) fest miteinander verbunden. Ein wesentlicher Prozessschritt dabei ist das Lötten. Dabei werden die Solarzellen durch verzinnte Kupferverbinder seriell verschaltet. Die Verbinder werden durch lokales Aufheizen und Aufschmelzen des Lötzinns mit der darunterliegenden Silberbusbar stoffschlüssig verbunden. Durch die Kupfer- Busbar- Verbindung kann der erzeugte Strom der Solarzelle abgeführt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer, Silber und Silizium entstehen, wegen der festen Verbindung der Stoffe, mechanische Spannungen im Silizium. Die Kenntnis dieser Spannungen ist von entscheidender Bedeutung für die Zuverlässigkeitsbewertung von Solarzellen. Durch Variation der Prozessparameter beim Lötten und geometrischer Verhältnisse der Kontaktstellen kann die Ausprägung dieser Spannungen beeinflusst werden.

Aufgabe dieser studentischen Arbeit soll es sein, ein Finite-Elemente-Modell zur transienten Berechnung des Temperaturfeldes beim Lötten von Solarzellen zu erstellen. Auf Basis dieser Temperaturfeldberechnung sollen die mechanischen Spannungen während und nach dem Lötten ermittelt werden. Mit Hilfe dieses Modells sollen Parameterstudien zu Prozess- und Geometrievariation der Lötverbindung durchgeführt werden.

## Schwerpunkte

- Thematische Einarbeitung in Themen der Zuverlässigkeitsbewertung von Solarmodulen
- Recherche und Klassifizierung von automatisierbaren Lötverfahren
- Erstellung eines FE- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium
- Durchführung von Parameterstudien

abzugebende Exemplare: drei + PDF- Datei

Prof. Dr.-Ing. Rolf Kademann  
Hochschulseitiger Betreuer

Prof. Dr. M. Staiger  
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit diese Masterarbeit selbständig angefertigt zu haben. Alle verwendeten Quellen habe ich dabei vollständig und genau angegeben an den Stellen an denen ich Passagen wörtlich oder sinngemäß entnommen habe.

Diese Arbeit wurde bisher noch nicht veröffentlicht und keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Merseburg, den 25. September 2013

.....

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei M. Eng. M. Sc. Sascha Dietrich für seine Unterstützung und die fachliche Beratung bedanken. Er stand mir stets bei fachlichen Fragen zur Verfügung und hat diese Masterarbeit durch seine Anregungen in die richtige Richtung gelenkt. Weiterer Dank gebührt M. Eng. Matthias Pander und M. Eng. M. Sc. Ulli Zeller, die mir bei auftretenden Problemen im Umgang mit ANSYS classic geholfen haben. Für die Bereitstellung seines selbst entwickelten Tools für die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit bin ich David Daßler dankbar.

Seitens der Hochschule Merseburg gebührt Prof. Dr.-Ing. Rolf Kademmann besonderer Dank, da er sich der Betreuung dieser Masterarbeit angenommen hat. Er war stets erreichbar und hat schnell und unkompliziert auf Fragen meinerseits eine gute Antwort parat gehabt.

Für die Ermöglichung dieser Masterarbeit bedanke ich mich bei der Leitung des Fraunhofer CSP und des Instituts für Werkstoffmechanik. Zum Schluss grüße ich alle Kollegen, die das Arbeitsklima so angenehm gemacht und an fachlichen Diskussionen teilgenommen haben.

Merseburg, 25. September 2013

# Inhaltsverzeichnis

Erklärung .....	
Danksagung .....	
Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungen .....	III
Verwendete Formelzeichen.....	IV
1 Einleitung.....	- 1 -
2 Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle .....	- 2 -
2.1 Aufbau der Solarzelle .....	- 2 -
2.2 Funktionsweise .....	- 3 -
2.3 Materialien .....	- 4 -
2.3.1 Silizium.....	- 4 -
2.3.2 Lot.....	- 5 -
2.3.3 Kupfer .....	- 5 -
2.4 Metallpasten.....	- 6 -
2.4.1 Silberpaste .....	- 6 -
2.4.2 Aluminiumpaste.....	- 7 -
2.4.3 Verfestigungsannahmen der Stoffe.....	- 7 -
2.5 Modulherstellung.....	- 9 -
2.6 Herstellung von Wafern aus monokristallinen Silizium .....	- 9 -
2.7 Löten.....	- 12 -
2.8 Laminieren .....	- 13 -
2.9 Rahmen .....	- 14 -
3 Vergleichsspannungshypothesen als Versagenskriterien.....	- 15 -
3.1 Hauptnormalspannungshypothese / Hauptspannungen .....	- 15 -
3.2 Schubspannungshypothese .....	- 16 -
3.3 Gestaltänderungsenergiehypothese .....	- 17 -
3.4 Vergleich spröder und duktiler Werkstoffe.....	- 18 -
4 Probabilistische Bruchmechanik.....	- 20 -
4.1 Allgemeines .....	- 20 -
4.2 Grundlagen .....	- 20 -
4.3 Bruchwahrscheinlichkeit .....	- 25 -
4.4 Bruchspannung .....	- 28 -
4.5 Verallgemeinerung für realitätsbezogene Problemstellungen .....	- 29 -
4.6 Übertragung auf die Problemstellung.....	- 29 -
5 Stand der Wissenschaft .....	- 33 -
6 Klassifizierung von automatisierbaren Lötverfahren .....	- 40 -
6.1 Allgemein Löten .....	- 40 -
6.2 automatisierbare Lötverfahren .....	- 41 -
6.3 Löten durch Auftragen von flüssigem Lot.....	- 41 -
6.3.1 Kolbenlöten .....	- 41 -
6.3.2 Lotbadtauchlöten.....	- 42 -
6.3.3 Wellenlöten .....	- 43 -
6.3.4 Rollenlöten .....	- 44 -
6.3.5 Flammlöten .....	- 44 -

---

6.4 Reflow-Löten .....	- 45 -
6.4.1 Mittels Heizplatte / Blocklöten .....	- 46 -
6.4.2 Widerstandslöten .....	- 46 -
6.4.3 Infrarotstrahler .....	- 47 -
6.4.4 Vollkonvektions-Reflow-Löten/ Zwangs-Konvektionslöten .....	- 47 -
6.4.5 Laserstrahllöten .....	- 47 -
6.4.6 Dampfphasenlöten .....	- 48 -
6.4.7 Induktionslöten .....	- 49 -
6.5 Löten in der Solarzellenproduktion.....	- 50 -
6.6 Beschreibung des Lötprozesses beim Tabber-Stringer .....	- 50 -
7 Erstellung eines FEM- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium.....	- 53 -
7.1 Modellierung der Solarzelle .....	- 53 -
7.2 Werkstoffkennwerte für die FEM-Analyse .....	- 54 -
7.3 Werkstoffe für den Lötöfen .....	- 56 -
7.3.1 Stahl.....	- 56 -
7.3.2 Kunststoff .....	- 57 -
7.4 Auswahl der Elementtypen .....	- 57 -
7.4.1 Volumenelement.....	- 57 -
7.4.2 Kontakt- und Zielelement .....	- 58 -
7.5 Einbringen der Kontaktpaare .....	- 58 -
7.6 Modellieren der Niederhalter.....	- 61 -
7.7 Modellieren des Kunststoffauflagers .....	- 63 -
7.8 Lösung des FEM-Modells .....	- 64 -
8 Durchführung von Parameterstudien .....	- 71 -
8.1 Ablauf der Bewertung der Parameterstudien.....	- 71 -
8.2 Beschreibung der Pfade .....	- 75 -
8.2.1 Pfade direkt und längs unter dem Busbar.....	- 75 -
8.2.2 Pfade auf dem Wafer quer zum Busbar .....	- 82 -
8.3 Breite Solarzellenverbinder.....	- 90 -
8.4 Temperaturverlauf .....	- 104 -
8.5 Lotdicke .....	- 107 -
8.6 Versatz der Solarzellenverbinder .....	- 111 -
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	- 124 -
Abbildungsverzeichnis .....	- 126 -
Tabellenverzeichnis .....	- 128 -
Quellen .....	- 129 -
Anhang .....	- 137 -

---

## Abkürzungen

FEM	Finite-Elemente-Methode
EVA	Ethylenvinylacetat
X26O	Pfad bei $x = 26$ mm an der Oberseite des Wafers
X26U	Pfad bei $x = 26$ mm an der Unterseite des Wafers
Y9O	Pfad bei $y = 9$ mm an der Oberseite des Wafers
Y9U	Pfad bei $y = 9$ mm an der Unterseite des Wafers
Y15O	Pfad bei $y = 15$ mm an der Oberseite des Wafers
Y15U	Pfad bei $y = 15$ mm an der Unterseite des Wafers
S <sub>1,2,3</sub>	Hauptspannungen
S <sub>x,y,z</sub>	Spannungen in den Raumkoordinaten



## Verwendete Formelzeichen

$U$	Spannung [V]
$T$	Temperatur [K]
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$\sigma$	Normalspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannungen [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_x$	Normalspannung in X-Richtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_y$	Normalspannung in Y-Richtung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{xy}$	Schubspannung in der XY-Ebene [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{max}$	Maximale Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$E$	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Dehnung
$R_e$	Elastische Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$R_{P 0,2}$	Dehngrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$K_I$	Sprödbruchbedingung
$K_{Ic}$	Bruchzähigkeit
$Y$	Einachsige Fließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$x$	Ereignis
$X$	Zufallsgröße
$F(x)$	Wahrscheinlichkeitsverteilung
$f(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichte
$P$	Wahrscheinlichkeit
$\langle X \rangle, \bar{X}$	Mittelwert
$var X$	Variant / Streuung
$\sigma$	Standardabweichung
$\mu$	Erwartungswert
$\Gamma$	Gammafunktion
$V$	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
$c$	Konstante
$P_f$	Bruchwahrscheinlichkeit
$P_f$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$V_0$	Normierungsgröße Volumen
$A_0$	Normierungsgröße Fläche

$\sigma_0$	Normierungsgröße Spannung
$\sigma_u$	Schwellspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$m$	Weibull-Modul
$\sigma_B$	Biegespannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_Z$	Zugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma^+$	Nichtnegative Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\psi$	PIA-Modell
$\sigma_{\max}$	Maximale Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$A_E$	Effektive Fläche [mm <sup>2</sup> ]
$V_E$	Effektives Volumen [mm <sup>3</sup> ]
$m$	Masse [kg]
$W$	Arbeit [J]
$\rho$	Dichte $\left[\frac{t}{mm^3}\right]$
$G$	Schubmodul [N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu_0$	Querkontraktionszahl / Poissonzahl [-]
$\alpha$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
$k$	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
$c$	Spezifische Wärme [J/(g*K)]
$k$	Schubfließspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$l$	Länge [mm]
$b$	Breite [mm]
$h$	Höhe [mm]

## 1 Einleitung

Durch die Technologie der Photovoltaik wird es möglich unabhängig von fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl, Gas und nuklearen Brennstoffen Energie zu Verfügung zu stellen. Photovoltaikmodule werden mittlerweile als Massenware hergestellt. Sie bestehen aus mehreren in Reihe geschalteten Solarzellen, die im Betrieb Licht in elektrische Energie umwandeln. Ihre Verschaltung erfolgt im Tabber-Stringer-Prozess, bei dem mehrere Solarzellen durch einen Solarzellenverbinder miteinander verbunden werden. Das Lot, welches den Kupferkern des Solarzellenverbinders ummantelt wird dabei aufgeschmolzen. Es verbindet sich mit dem Busbars der Solarzellen auf denen die Solarzellenverbinder positioniert werden. Durch diesen thermischen Prozess und aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungen der einzelnen Komponenten einer Solarzelle können mechanische Spannungen in der Solarzelle entstehen, die zum teilweisen oder vollständigen Ausfall der Solarzelle führen.

Diese Arbeit setzt sich daher mit den Einflussfaktoren beim Lötprozess auseinander, die zum Ausfall einer Solarzelle führen können. Des Weiteren werden Parameterstudien durchgeführt, die aufzeigen sollen welche Parameter für den Lötprozess verwendet werden sollen, um die Bruchwahrscheinlichkeit und damit die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Solarzelle zu minimieren. Die Grundlage dieser Parameterstudien ist ein selbst erstelltes FEM-Modell einer Solarzelle, welches einfach an die unterschiedlichen geometrischen Größen und Umgebungsbedingungen angepasst werden kann. Von den Ergebnissen dieser Arbeit sollen sowohl die Hersteller, als auch die Anwender von Solarmodulen profitieren. Durch eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit in der Produktion können die Kosten gesenkt werden und beim späteren Betrieb können langfristig stabile Erträge erzielt werden.

Mit den vielen kleinen Verbesserungen die in den letzten Jahren im Bereich der Photovoltaik (und anderen Branchen) gemacht wurden und in den nächsten Jahren gemacht werden, kann eine Energiewende erfolgen. Langfristig gesehen schont das die Umwelt und macht uns alle unabhängiger von schwankenden Energiepreisen.

## 2 Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle

### 2.1 Aufbau der Solarzelle

Bei der Solarzelle Q6LMX3 (Abbildung 1) der Marke Q-Cells handelt es sich um eine vollquadratische monokristalline Solarzelle, die sich vor allem durch einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 17,4% auszeichnet. Die quadratischen Abmaße sind jeweils 156 mm in Breite und Länge sowie 0,2 mm in der Tiefe des Wafers. Auf diesem Wafer, der aus monokristallinem Silizium besteht, wird in einem ersten Prozessschritt zuerst Silberpaste im Siebdruckverfahren aufgebracht. Die hier entstandenen Busbars dienen später dazu den Ladungstransport der Solarzelle zu realisieren. Ihre Abmaße betragen auf der Vorderseite 1,5 mm in der Breite und 153 mm in der Länge über der Solarzelle. Auf der Rückseite hingegen sind sie 3 mm breit und 126 mm lang. Die Dicke beträgt auf beiden Seiten 0,03 mm. Auf der Rückseite des Wafers an den Flächen, an denen sich keine Silberpaste befindet, ist der Rückseitenkontakt aus Aluminiumpaste mit den quadratischen Abmaßen von 154 mm x 154 mm und einer Höhe von 0,03 mm angebracht.

Auf den Busbars werden in einem darauf folgenden Prozessschritt – dem Löten – die Solarzellenverbinder (auch Ribbons genannt) aufgebracht. Durch die Ribbons kann dann die elektrische Ladung an den Verbraucher weitergegeben werden. Ihre Abmaße sind auf Vorder- und Rückseite identisch und betragen 1,3 mm in der Breite und 0,111 mm in der Dicke. Verbunden werden Busbar und Ribbon durch das Lot mit einer angenommenen Dicke von 0,0255 mm.

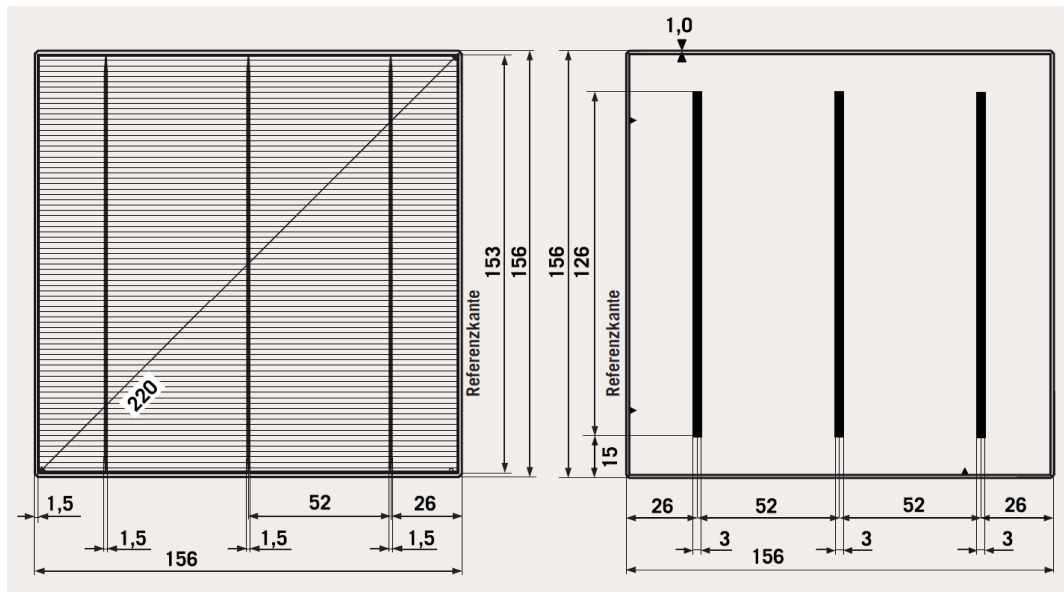


Abbildung 1: Technische Zeichnung der Solarzelle [1]

## 2.2 Funktionsweise

Der Begriff Photovoltaik leitet sich aus dem griechischen Wort „phos“ für Licht und Alessandro Volta ab, welcher Pionier im Bereich der Erforschung der Elektrizität war. [2] Um Licht in für uns nutzbare Elektroenergie zu verwandeln, wird ein physikalischer Effekt verwendet. Der Grundbaustein für diesen Effekt ist ein Halbleiter mit vier Außenelektronen.

Der am häufigsten verwendete Halbleiter in der Photovoltaik ist Silizium. Es ist durch seine Außenelektronen mit den Nachbaratomen verbunden. Da die Elektronen fest im Siliziumgitter eingebaut sind, kann kein Strom fließen. Somit müssen bewegliche Elektronen dem Siliziumgitter hinzugefügt und damit eine Schicht n-dotiert (negativ) werden. Hierfür finden fünfwertige Atome wie beispielsweise Phosphor Verwendung.

Das Pendant dazu stellt die p-dotierte (positiv) Schicht dar. Dafür muss eine Schicht des Siliziums mit dreiwertigen Atomen bestückt werden. Es entstehen Lücken oder Löcher welches dazu genutzt werden um Elektronen aufzunehmen.

Der Übergang dieser dotierten Schichten heißt p/n-Übergang oder Grenzschicht. Im Bereich dieser Grenze diffundieren die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht, womit sich eine von freien Ladungsträgern verarmte Raumladungszone ausbildet.

Die n-dotierte Schicht muss möglichst dünn sein, damit das Sonnenlicht in der Raumladungszone absorbiert wird. Die p-dotierte Schicht ist dicker, damit tiefer

eindringende Sonnenstrahlen absorbiert werden können und die mechanische Stabilität der Solarzelle gewährleistet ist.

Die Raumladungszone ist der eigentliche Ort der Energieumwandlung. Wenn ein Photon in die Raumladungszone trifft, wird ein Elektron aus einem positiven Loch herausgelöst.

Trifft Licht auf Elektronen in der Raumladungszone, die sich an die Löcher gehaftet haben, werden diese aus den Löchern herausbefördert. Die Feldkraft in der Solarzelle sorgt dafür, dass das Elektron nicht wieder zurückfällt, sondern beschleunigt es zur positiven Raumladung im n-dotierten Bereich und das positive Loch zur negativen Raumladung im p-dotierten Bereich. An den angebrachten Metallkontakten entsteht eine Spannung von ca.  $0,5V$ . Durch den Fluss der Elektronen kann elektrische Arbeit verrichtet werden, sobald ein Verbraucher (Widerstand) angeschlossen ist. [3] [4] Abbildung 2 zeigt die Funktionsweise einer Solarzelle auf.

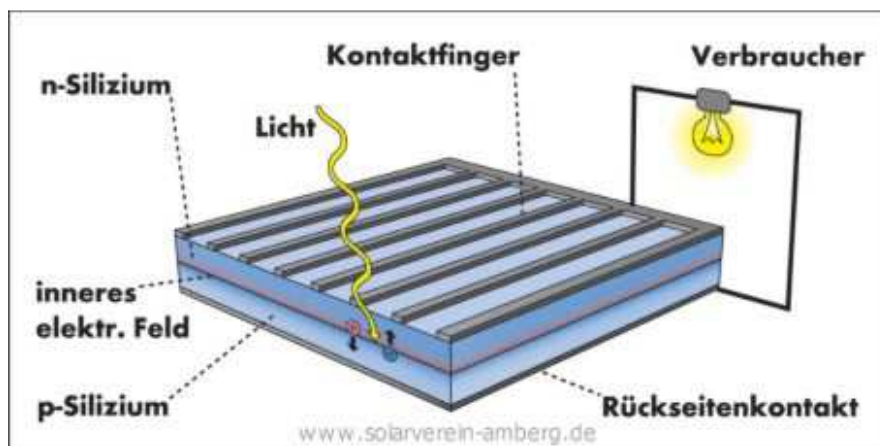


Abbildung 2: Funktionsweise einer Solarzelle [5]

## 2.3 Materialien

### 2.3.1 Silizium

Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe des Periodensystems. Es besitzt vier Außenelektronen. Dieser Atomaufbau macht es zu einem Element mit vielseitigen Eigenschaften, die in der Halbleitertechnik oder speziell in der Photovoltaik Verwendung finden.

Neben den elektrischen Eigenschaften, die es so wichtig für die heutige Zeit machen, besitzt es mechanische Eigenschaften, die für die meisten Anwendungen nachteilig

sind. So handelt es sich bei Silizium um einen sehr spröden Werkstoff. Es verhält sich anders als die duktilen Werkstoffe bei einer Überschreitung der Streckgrenze. Diese verformen sich plastisch, bevor sie versagen. Spröde Werkstoffe wie Silizium hingegen reißen kurz nach Überschreitung der Streckgrenze.

Bezogen auf die Photovoltaik ergibt sich daraus das Problem, dass beim Bruch des Siliziums die Solarzelle versagt und somit an den gebrochenen Stellen keine Ladungsträger mehr übertragen werden können.

Aus diesen Gründen wird bei der späteren FEM-Berechnung und Auswertung das Hauptaugenmerk auf dem aus Silizium gefertigten Wafer liegen, der auf Grund seiner Eigenschaften als schwächstes Glied angesehen werden kann.

### **2.3.2 Lot**

Das Lot mit dem die Löttaufgabe in der FEM-Simulation berechnet wird besteht aus Zinn und Blei bei einem Masseverhältnis von 63 % Zinn und ca. 37 % Blei (Sn63Pb37). In geringen Konzentrationen sind auch andere Stoffe darin enthalten. Die Schmelz- und damit auch die Erstarrungstemperatur liegen bei 183 °C. Für die FEM-Simulation bedeutet dies, dass bei dieser Temperatur die Verbindung zwischen den Kupferbändchen und den Busbars erstmalig eintritt.

### **2.3.3 Kupfer**

Die Solarzellenverbinder (auch Ribbons genannt) sind rechteckige Kupferkerne, die mit Lot ummantelt sind. Sie dienen zur elektrischen Verschaltung der einzelnen Solarzellen. Durch die teilweise geringen Spannungen und Ströme die in einer Solarzelle im Betrieb fließen, ist es notwendig, dass das Kupfer dabei eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt.

Aus diesem Grund werden vor allem hochreine Kupfersorten wie die sauerstofffreien OFHC-Cu und OF-CU 99,99 % verwendet, die bei einer thermischen Behandlung nicht zum Verzundern neigen, sowie Cu-ETP 99,9 %, welches außerdem eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt.

Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Silizium und Kupfer führen beim Lötprozess zu mechanischen Spannungen im Wafer und in den Ribbons. Dies kann die Lebensdauer der Solarmodule negativ beeinflussen. [6] [7]

## 2.4 Metallpasten

Bei der Fertigung von Solarzellen kommen zwei Sorten von Metallpasten zum Einsatz. Zum einen die Aluminiumpaste, welche den Rückseitenkontakt der Solarzelle bildet und zum anderen die Silberpaste, aus der die Busbars gefertigt werden.

Die Bestandteile in denen sich beide Pasten ähneln sind die Glasfritten und die organischen Bestandteile.

### **Glasfritte:**

Eine Glasfritte ist ein poröses Material (gewöhnlicher Weise Blei-Bor-Silikat-Glas), welches in gemahlener Form als Binder zwischen den Metallpartikeln und der Siliziumträgerschicht dient. Es erleichtert den Prozess des Einbrennens der Metallpasten auf dem Substrat. Die Bindungsphase zwischen Silizium und den Glasfritten sorgt für die mechanisch notwendige Stabilität. [8] Für gewöhnlich haben die Glasfritten einen Durchmesser von 1 bis 10  $\mu\text{m}$ . [9]

### **Organische Bestandteile:**

Zur Verbesserung des Fließverhaltens beim Auftragen der Paste sind organische Anteile von Vorteil. Dabei übernehmen sie die Aufgabe des Dispersionsmediums für das Metallpulver und die Glasfritten. [8]

### 2.4.1 Silberpaste

Die Silberpaste wird im Siebdruckverfahren auf den Wafer aufgetragen. Die so entstandenen Kontaktfinger dienen der Kontaktierung des Emitters.

Dadurch wird die Sammlung von Ladungsträgern ermöglicht, die durch den photovoltaischen Effekt entstehen. Die dünnen Kontaktfinger auf der Vorderseite sind durch breite Streifen der Silberpaste (Busbars) verbunden. Auf der Rückseite sind ebenfalls Busbars angebracht.

Die Silberpaste besteht hauptsächlich aus drei Komponenten. Zum einen aus dem Silberpulver, welches die leitende Funktion im späteren Betrieb übernimmt, Glasfritten und einem organischen Träger. Die Glasfritten sind hierbei wichtig, um eine Bindungsphase zwischen dem Silizium und dem Silber zu ermöglichen. Dies geschieht



durch das im Glas enthaltene Blei welches den Sintervorgang beim Einbrennen unterstützt. [8]

Durch die Busbars wird es erst möglich einzelne Zellen durch den Lötprozess zusammen zu verschalten. Die Busbars sind dabei unverzichtbar, weil Silizium durch herkömmliche Lote nicht lötbar ist.

### **2.4.2 Aluminiumpaste**

Der Wirkungsgrad ist ein wichtiger Faktor für die Qualität von Solarzellen. Aus diesem Grund versucht die Forschung ihn stets zu erhöhen. Ein Glied, welches dazu beiträgt, ist der Rückseitenkontakt. Er verringert die Anzahl der Ladungsträger die rekombinieren und damit nicht mehr elektrisch genutzt werden können. Die Implementierung eines Rückseitenkontaktes gehört zu den am häufigsten verwendeten effizienzsteigernden Konzepten. [10]

Der Rückseitenkontakt besteht aus Aluminiumpartikeln, Glasfritten und Lösungsmitteln die durch ein organisches Trägermittel miteinander verbunden sind. [9]

Bei der Herstellung der Solarzelle wird auf den Siliziumwafer eine Schicht Aluminium mit dem Siebdruckverfahren aufgetragen und in einem weiteren Prozessschritt thermisch mit dem Wafer verbunden. Dabei entstehen Spannungen, die dazu führen, dass sich der Wafer leicht verbiegt. Dieses Phänomen soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht werden.

### **2.4.3 Verfestigungsannahmen der Stoffe**

Wenn metallische Werkstoffe plastisch verformt werden, tritt im Allgemeinen eine Verfestigung auf. Dabei erhöht sich die Streckgrenze des Werkstoffes, was im Spannungs-Dehnungs-Diagramm nachvollzogen werden kann. Im elastischen Bereich ist die Dehnung proportional zur Spannung. Wird die Streckgrenze überschritten, steigt auch die ertragbare Spannung, jedoch bei einer größeren Dehnung des Werkstoffes. Dieses Phänomen ist die Verfestigung. Für numerische Berechnungen müssen die Verfestigungsregeln definiert werden.

#### **Kinematische Verfestigung**

Ein Bauteil, welches über seinen elastischen Bereich hinaus belastet wird, zieht sich nach der kinematischen Verfestigungstheorie wieder genau um den Betrag zusammen,

um den es sich elastisch ausgedehnt hat. Wird anschließend das Bauteil auf Druckbelastet, muss wieder dieselbe Differenzspannungsdifferenz aufgeben werden, um das Material erneut zum Fließen zu bewegen. Die Folge ist eine Verschiebung der Fließflächen. Besteht der Graf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms aus zwei unterschiedlichen Geraden, wird vom bilinearen Materialverhalten gesprochen. Das folgende Bild zeigt den Hystereseverlauf bei bilinearen Materialverhalten. [11] Abbildung 3 zeigt das Prinzip der kinematischen Verfestigung.

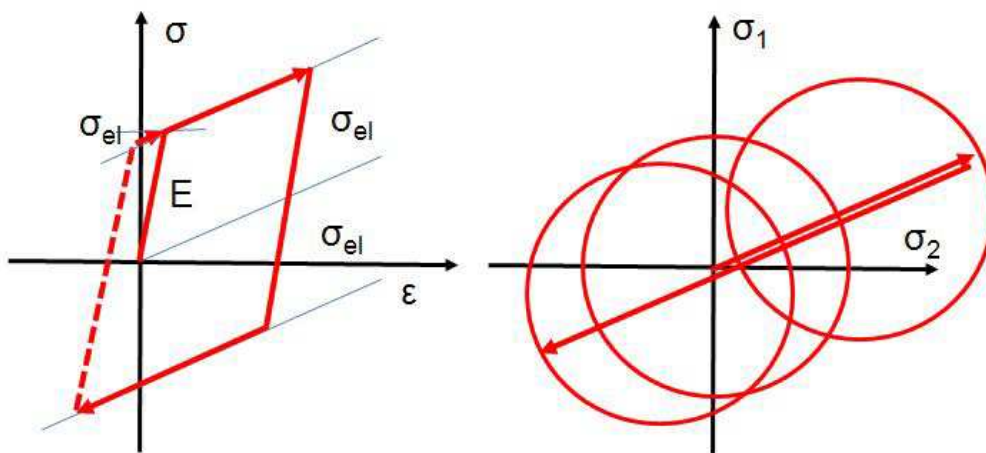


Abbildung 3: Grafische Darstellung der kinematischen Verfestigung [12]

Anwendung findet das bilineare Materialverhalten bei der späteren Simulation für das Kupfer und das Zinn-Blei-Lot.

### Isotrope Verfestigung

Die isotrope Verfestigung zeichnet sich dadurch aus, dass eine Spannung, die zu einer Verfestigung des Materials führt, in negativer Richtung erreicht werden muss, um das Material weiter verfestigen zu können. Die maximale Spannung, die das Material bis zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht hat, muss also immer mindestens erreicht, oder überschritten werden, bevor es wieder zu fließen beginnt. Die Fließflächen verschieben sich also nicht, sondern vergrößern sich. [11] In der Abbildung 4 wird die isotrope Verfestigung bildlich dargestellt.

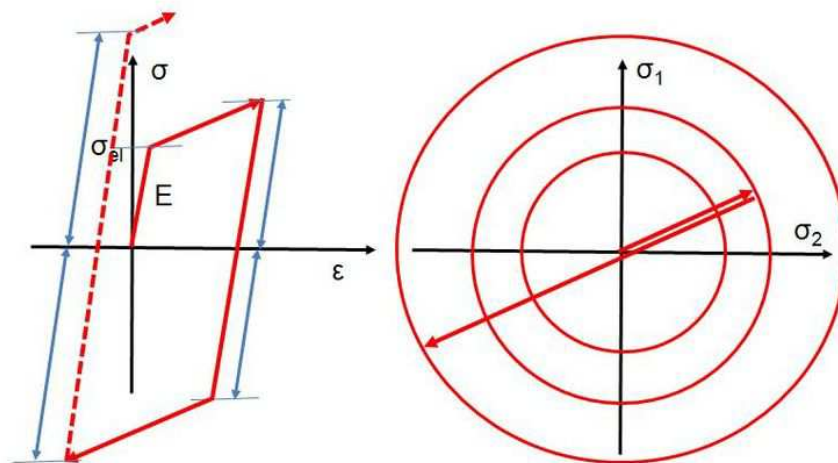


Abbildung 4: Grafische Darstellung der isotropen Verfestigung [13]

In der späteren Simulation kommt das isotrope Verfestigungsgesetz bei der Silber- und Aluminiumpaste zum Einsatz.

## 2.5 Modulherstellung

Die Herstellung von Solarmodulen besteht aus mehreren Prozessschritten, die nötig sind um einerseits die gewünschten elektrischen Eigenschaften zu erreichen und andererseits die Solarzellen vor mechanischen Einflüssen zu schützen, die ihr Versagen verursachen können. In den folgenden Passagen wird daher auf die Herstellung der Solarzellen eingegangen aus denen ein Solarmodul besteht. Es wird auf die elektrische Verschaltung der Solarzellen, den Laminierungsprozess, sowie auf die Rahmung der Solarmodule eingegangen. Jeder dieser Produktionsschritte kann auch negative Einflüsse auf die Lebensdauer der Solarmodule haben, welche hier aufgeführt werden.

## 2.6 Herstellung von Wafern aus monokristallinen Silizium

Die Herstellung von Wafern aus Silizium ist ein sehr energieintensiver und damit kostenintensiver Prozess bei dem Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) in einem ersten Schritt unter Zugabe von Kohlenstoff (C) bei einer Temperatur von etwa  $1800^\circ\text{C}$  reduziert wird. Es entstehen zunächst Silizium mit einer Reinheit von ca. 98% und giftiges

Kohlenstoffmonoxid (CO). Im darauf folgenden Schritt muss das Silizium pulverisiert und chemisch mit Salzsäure gereinigt werden. Dabei geht die Salzsäure eine Bindung mit dem Silizium ein und es entsteht Trichlorsilan. Diese Flüssigkeit muss anschließend destilliert werden um das jetzt reine Silizium zu erhalten. In einem weiteren energieintensiven Prozess wird das polykristalline Silizium wieder bei 1410 °C geschmolzen und mit Hilfe eines Impfkristalls im Czochralski-Verfahren oder durch das Zonenschmelzverfahren monokristallines Silizium hergestellt. Fremdatome wie Phosphor und Bor werden dabei gezielt eingebracht, damit später der photovoltaische Effekt genutzt werden kann. Weitere Prozessschritte folgen. [14] [15]

## Sägen

Anschließend werden die Einkristalle in die gewünschte Dicke und Form gesägt, wobei nur etwa 50 % des Einkristalls zu nutzbaren Wafern werden. Die Oberflächen der Wafer werden anschließend noch weiter behandelt. [14] [15]

## Schaden/Texturätzen

Durch diesen Schritt werden die Schäden, die beim Sägen der Wafer entstanden sind, entfernt. Dazu werden die Wafer mit einer ätzenden Lösung behandelt. Gleichzeitig entsteht eine Textur auf der Oberfläche der Wafer, die die Lichtstrahlen, die in die Solarzelle eingetroffen sind wieder reflektieren können und somit den Wirkungsgrad erhöhen wie die Abbildung 5 zeigt. [16]

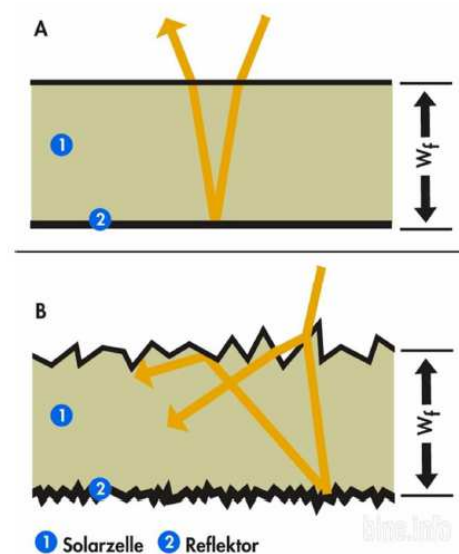


Abbildung 5: Vergleich Solarzelle ohne Textur und mit Textur

### **Diffusion für den pn-Übergang**

Hierbei wird Phosphor in die Oberfläche des Wafers diffundiert. Das ist notwendig, um den pn-Übergang herzustellen. Anschließend muss die ungewollt entstandene Phosphor-Silikat-Schicht durch einen weiteren Ätzzvorgang wieder entfernt werden. [16]

### **Aufbringen der Anti-Reflexionsschicht**

Der Wirkungsgrad der späteren Solarzelle wird durch das Aufbringen einer Anti-Reflexionsschicht aus Siliziumnitrid weiter erhöht. Des Weiteren kann die Farbe der Solarzelle durch diesen Prozess den Kundenwünschen angepasst werden. [16]

### **Aufbringen der Silberpaste Vorderseite**

Um die elektrische Energie, die im Betrieb der Solarzelle erzeugt wird, nutzen zu können, müssen Busbars auf der Vorderseite aufgebracht werden. Möglich wird dies durch den Siebdruck, bei dem die Silberpaste durch eine Schablone auf die Solarzelle gedruckt wird. [16]

### **Rückseitenkontakt**

Auch die Rückseite muss kontaktiert werden. Dabei wird ein ganzflächiger Rückseitenkontakt aus Aluminiumpaste aufgedruckt. Unter den Busbars der Vorderseite werden die Busbars der Rückseite mit Silberpaste aufgedruckt. [16]

### **Feuern**

In diesem Prozessschritt werden die Silber- und Aluminiumpaste bei einer Temperatur von 800 °C bis 900 °C in das Silizium des Wafers gebrannt. Die Busbars können danach für die weitere Verschaltung der Solarzellen verwendet werden. Aus dem Aluminium und dem Silizium entsteht eine Al-Si-Legierung auf der Rückseite, die den Rückseitenkontakt bildet. Dadurch werden die beim Betrieb entstandenen Ladungsträger daran gehindert zu rekombinieren. [16]

## **Kantenisolation**

Durch die vorangegangenen Prozessschritte ist die Solarzelle kurzgeschlossen, weil die Vorderseite der Solarzelle über den Rand mit der Rückseite elektrisch verbunden ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Trennung des elektrischen Kontaktes durch einen Graben der durch einen Laser geschaffen wird. [16]

## **2.7 Löten**

Um die Spannung zu erhöhen, werden die eben gefertigten Solarzellen im Tabber-Stringer-Prozess seriell miteinander verschaltet. Als Verbindungselemente dienen dabei Solarzellenverbinder oder auch Ribbons genannt. Sie bestehen üblicherweise aus hochreinem Kupfer und sind mit einer Lotschicht ummantelt, die bei ausreichender Temperaturzufuhr schmilzt und beim Abkühlen wieder erstarrt. Die Solarzellenverbinder werden beim Tabber-Stringer-Prozess auf den Busbars der Solarzelle positioniert und von der Oberseite der ersten Solarzelle zur Unterseite der zweiten Solarzelle geführt. Eine variable Anzahl von Solarzellen kann durch die Wiederholung des Vorgangs miteinander seriell verschaltet werden.

### **Schadensursachen beim Löten**

Durch die Prozesskette der Reinsilizium- und Waferherstellung wird ersichtlich, dass die Wafer der Solarzellen sehr dünn sind um die Produktionskosten gering zu halten. Jedoch werden durch die Einsparung in der Dicke der Wafer die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst.

Daher sind die mechanischen Wechselwirkungen beim Lötprozess exakt zu beachten. Die Hauptursache liegt dabei bei den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Silizium ( $2,6e^{-6}K^{-1}$ ) und Kupfer ( $16,5e^{-6}K^{-1}$ ). Der Aufheizprozess auf über 200 °C induziert eine Ausdehnung aller Materialien der Solarzelle, wobei sich das Kupfer noch unabhängig vom Rest der Solarzelle ausdehnen kann. Bei einer Temperatur von 183 °C schmilzt das Lot, welches das Kupfer umhüllt. Die anschließende Abkühlung bewirkt wieder ein Zusammenziehen der Materialien, was bis zu einer Temperatur von 183°C ungehindert geschieht. Ab 183°C erstarrt dann das Zinn-Blei-Lot und das Kupfer der Ribbons wird an der Kontraktion gehindert. Die Wechselwirkungen durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten in

Verbindung mit dem E-Modul von Silizium ( $130247 \text{ N/mm}^2$ ) und Kupfer ( $85700 \text{ N/mm}^2$ ) kommen jetzt zum Tragen. Aus diesem Grund bauen sich Spannungen in den Ribbons und dem Wafer auf, die zu mikroskopischen Rissen im Silizium führen oder bereits bestehende Risse vergrößern können.

Das Lot spielt bei der Entstehung der mechanischen Spannung eine weitere Rolle, so kann es durch seine geringe Streckgrenze in Verbindung mit dem Effekt des zeit- und temperaturabhängigen Kriechens Spannungen aufnehmen und verringert somit die Spannungen die im Wafer und im Ribbon nach dem Löten wirken.

Erwähnenswert ist auch, dass die beim Löten verwendeten Materialien, Geräte und Verfahren einen Einfluss auf die spätere Leistungsausbeute der Solarzellen haben können. [17] [18] [19] [20] [21]

## 2.8 Laminieren

Der Prozessschritt des Laminierens dient vor allem dazu, die Solarzellen im späteren Betrieb vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit und Wind zu schützen. Als Grundmaterial dient ein spezielles Solarglas auf das eine transparente Kunststoffolie (EVA) gelegt wird. Darauf werden die Solarzellen-Strings positioniert. Diese werden wiederum seriell miteinander verschaltet. Auf die Solarzellen kommt eine weitere EVA-Schicht, was eine vollständige Umhüllung der Solarzelle bewirkt. Zur Isolation dient eine Schicht Rückseitenfolie, die Kurzschlüsse verhindert und zusätzlichen Schutz vor äußeren Einflüssen im Betrieb bietet.

Diese vielen einzelnen Schichten werden anschließend unter Druck und mit ausreichender Temperatur im Laminiergerät zusammengeschmolzen. Die Solarzellenstrings sind jetzt vollständig in EVA eingekapselt und damit vor mechanischen Einflüssen, Feuchtigkeit und durch das Solarglas vor ultravioletter Strahlung geschützt. [22]

### Schadensursachen beim Laminieren

Auch hier werden die einzelnen Solarzellen ähnlich wie beim Lötprozess großen Temperaturänderungen ausgesetzt. Da der Laminierungsprozess bei einer Temperatur von ca.  $150 \text{ °C}$  durchgeführt wird, dehnen sich an der Solarzelle vor allem das Kupfer und das Silizium wieder aus und Spannungen werden so im Bereich der Busbars in das System induziert. Durch die Kunststoffschichten und das Solarglas werden ebenfalls Spannungen in die Solarzelle übertragen. [23]

## **2.9 Rahmen**

Im letzten Schritt der Solarmodulherstellung werden die soeben laminierten Solarzellen in einen Rahmen eingesetzt. Dieser sorgt durch seine Verwindungssteifheit für die notwendige mechanische Belastbarkeit, die ein Modul über der Lebensdauer ertragen muss. Üblicherweise bestehen diese Rahmen aus Aluminium. Abschließend muss eine Anschlussdose an dem Solarmodul angebracht werden, die es ermöglicht, die elektrische Leistung des Solarmoduls an die Verbraucher weiterzuleiten. [24]



### 3 Vergleichsspannungshypothesen als Versagenskriterien

Es existieren mehrere Vergleichsspannungshypothesen, die angewendet werden um das Versagen eines Bauteils bestimmen zu können. In einem dreidimensionalen Bauteil existieren im Normalfall sechs verschiedene Spannungen – drei Normalspannungen und drei Schubspannungen – die gleichzeitig wirken. Da es jedoch oft nur einen Festigkeitskennwert gibt, der die Grundlage für das Versagen eines Bauteils bildet, müssen sogenannte Vergleichsspannungen gebildet werden, die dann mit den Festigkeitswerten verglichen werden können. Auf diese Problematik wird im folgenden Abschnitt eingegangen und die wichtigsten Vergleichsspannungshypothesen aufgezeigt.

#### 3.1 Hauptnormalspannungshypothese / Hauptspannungen

*„Hauptspannungen, beschreiben die drei aufeinander senkrecht stehenden Normalspannungen unter der Bedingung, daß die Tangentialspannungen null werden.“*  
[25]

In einem Geometrieelement, auf dem Kräfte wirken, können sich bis zu sechs Spannungen befinden. Drei Normalspannungen, die senkrecht auf den Flächen des Geometrieelements stehen und vom Element wegweisen sowie drei Schubspannungen, die tangential zu je einer Fläche oder Kante wirken. Für einige Anwendungsbereiche ist es daher notwendig Hauptspannungen zu verwenden. Dazu müssen die Hauptachsen des Koordinatensystems so gedreht werden, dass die Schubspannungen „null“ sind. Als Resultat entstehen bis zu drei Hauptspannungen.

Unter der Berücksichtigung, wie Geometrie und Last gestaltet sind, handelt es sich um einen einachsigen (gezogener oder gedrückter Stab), zweiachsigen (Scheibe) oder dreiachsigen Spannungszustand (allgemeiner Raumkörper mit allgemeiner Belastung).

Im zweiachsigen Spannungszustand, der in dieser Arbeit verwendet werden soll, berechnen sich die erste und zweite Hauptspannung wie folgt:

$$\sigma_{1,2} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{2} + \tau_{xy}^2} \quad 3-1$$

[26]

Beim dreiachsigen Spannungszustand ist die Berechnung der Hauptspannungen hingegen nicht mehr trivial und kann bei Bedarf der Quelle [24] entnommen werden. Anwendung findet die Hauptspannungsnormalhypothese vor allem bei spröden Werkstoffen und bei schlagartigen Belastungsfällen.

### 3.2 Schubspannungshypothese

Nach der Schubspannungshypothese fängt ein Material an zu fließen, wenn in einem Element eine kritische Schubspannung (Schubfließspannung  $k$ ) erreicht wird. Durch die Anwendung des Mohr'schen Spannungskreises wird es möglich, die Spannungen, die auf ein Element wirken, zu ermitteln.

Ist die maximale Schubspannung  $\tau_{max} = k$  beginnt der Werkstoff zu fließen. Da beim einachsigen Zugversuch bestimmte Materialien ebenfalls fließen, lässt sich daraus folgern, dass auch hierbei die kritische Schubspannung erreicht wird.

Daraus lässt sich ableiten, dass

$$k = \frac{Y}{2} \quad 3-2$$

ist, wobei  $Y$  die einachsige Fließspannung des Materials ist.  $Y$  ist dabei temperaturabhängig und sinkt bei steigender Temperatur. Die Schubspannungshypothese kann beschrieben werden als:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = Y \quad 3-3$$

Die maximalen und minimalen Hauptspannungen erzeugen den größten Mohr'schen Spannungskreis und damit auch die größte Schubspannung. Die mittlere Hauptspannung hat demnach keinen Einfluss auf das Fließen eines Werkstoffes. Schubspannungen führen bei zähen Werkstoffen zum Versagen, weshalb hier die Schubspannungshypothese angewendet wird. [27]

### 3.3 Gestaltänderungsenergiehypothese

Die Gestaltänderungsenergiehypothese, oder auch Mises-Vergleichsspannung genannt, gibt an, dass plastisches Fließen eines Werkstoffes durch die Überschreitung der Gestaltänderungsenergiegedichte über einen kritischen Wert hervorgerufen wird. Die Beziehungen zwischen Hauptspannungen  $\sigma_{1,2,3}$  und Fließspannung  $Y$  sind:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2Y^2 \quad 3-4$$

Im Unterschied zur Schubspannungshypothese kommt dabei auch die mittlere Hauptspannung zum Tragen. Eingesetzt wird die Gestaltänderungsenergiehypothese besonders bei zähen Werkstoffen, die unter einer schwingenden Belastung versagen. [28]

Die Abbildung 6 zeigt anschaulich die ungefähren Anwendungsbereiche der Vergleichsspannungshypothesen.

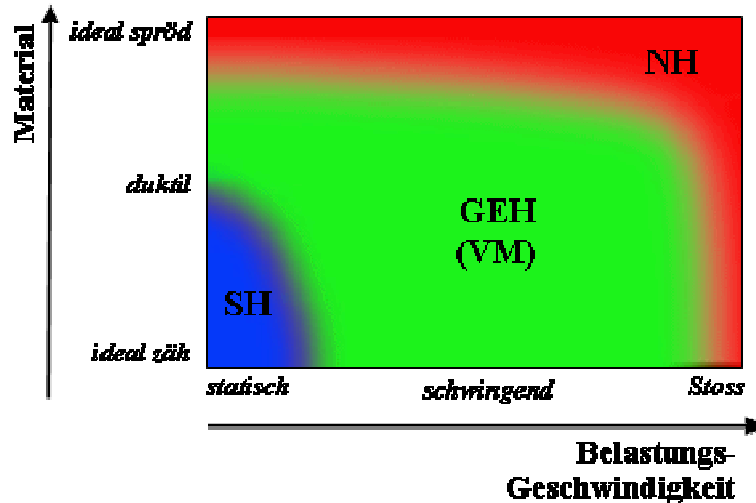


Abbildung 6: Anwendungsbereiche der Vergleichsspannungshypothesen [29]

### 3.4 Vergleich spröder und duktiler Werkstoffe

Die Grundlage für die Dehnung eines Materials durch eine mechanische Spannung wird mit dem Hooke'schen Gesetz mathematisch beschrieben. Die einachsige Spannung im Inneren eines Werkstückes berechnet sich aus seinem materialspezifischen Elastizitätsmodul  $E$  und der Dehnung  $\varepsilon$  der er ausgesetzt ist:

$$\sigma = E \varepsilon \quad 3-5$$

Bei den meisten Materialien entsteht so ein linear-elastischer Bereich zum Beginn des Spannungs-Dehnungs-Diagramms – die Hooke'sche Gerade. Am Ende dieser Hooke'schen Gerade wird die Streckgrenze  $R_e$  eines Materials definiert. Bei Materialien (wie z.B. Aluminium) die keine perfekte Hooke'schen Gerade besitzen, wird ein Wert angegeben bei dem sich das Material dauerhaft um 0,2% plastisch verformt. Hierbei handelt es sich um die 0,2 %-Dehngrenze  $R_{p0,2}$ . Die Abbildung 7/Abbildung 8 zeigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme von duktilen Werkstoffen.

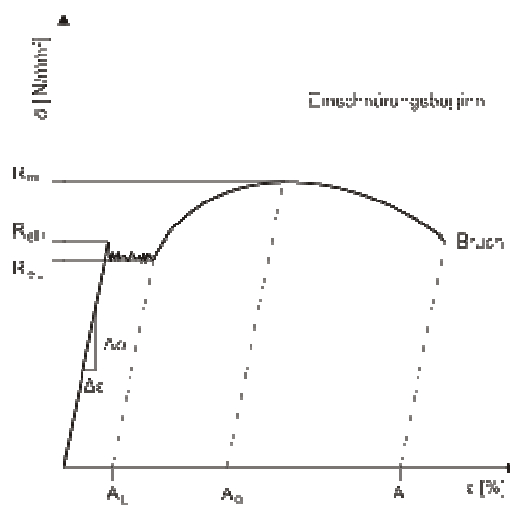


Abbildung 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines duktilen Werkstoffes [30]

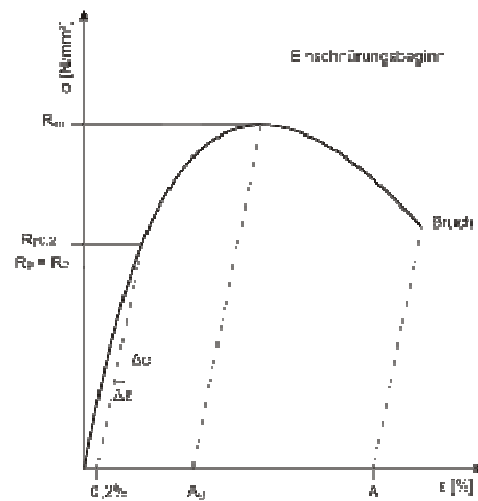


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines duktilen Werkstoffes ohne ausgeprägte Hooke'sche Gerade [31]

Spröde Werkstoffe hingegen bilden keine oder nur eine geringe plastische Verformung bei Überschreitung des linear-elastischen Bereichs aus. Sie versagen kurz danach. Der Spröbruch wird begünstigt durch:

„• relativ tiefe Temperaturen (je nach Kristallstruktur und Bindungsart)

- gleichsinnig mehrachsige Beanspruchungen
- große Beanspruchungsgeschwindigkeiten
- Versprödungserscheinungen während des Betriebs
- schlecht verformungsfähige Werkstoffzustände

-> Keramische Werkstoffe versagen stets durch Spröbruch“ [32 - S. 107]

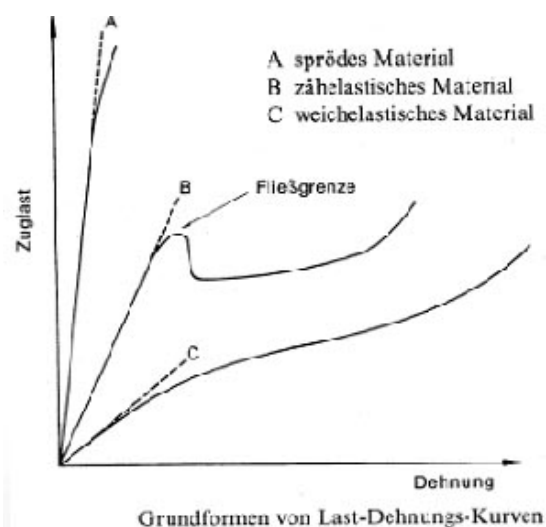


Abbildung 9: Vergleich von duktilen und spröden Werkstoffen [33]

## 4 Probabilistische Bruchmechanik

### 4.1 Allgemeines

Um das Versagen einer Struktur untersuchen zu können, müssen die Bruch- und Versagensbedingungen bekannt sein. Im Unterschied zur deterministischen Untersuchung beachtet das probabilistische Analyseverfahren „*die Streuung der Materialeigenschaften und die Unsicherheiten hinsichtlich der Belastung und der Defektverteilung ein geeigneter Weise*“ [34 - S. 333]. Es wird davon ausgegangen, dass die eingehenden Größen der Versagensbedingung in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegen. Dadurch ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit, die das Bruchrisiko bestimmt.

In einem realen Bauteil befinden sich viele Defekte wie Mikroporen, Mikrorisse, Einschlüsse oder Inhomogenitäten unterschiedlicher Größe, Form und Orientierung. Sie bestimmen die Bruchwahrscheinlichkeit. Durch ihre Anzahl lassen sich ihre Auswirkungen auf ein makroskopisches Werkstück mit statistischen Methoden beschreiben.

Bei spröden Werkstoffen, wie Keramiken, streuen die Festigkeitswerte teilweise sehr stark. Dabei ist zu beobachten, dass ihre Festigkeit deutlich bei größer werdenden Volumen abnimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass in einem größeren Volumen eine höhere Wahrscheinlichkeit vorliegt, dass ein noch kritischerer Defekt vorkommt.

Weibull hat sich diesem Phänomen angenommen und die statistische Theorie für den Spröbruch entwickelt. Diese wird heute noch verwendet um keramische Werkstoffe, faserverstärkte Materialien, Geomaterialien, Beton oder spröde Metalle zu beurteilen. [34]

### 4.2 Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die mathematischen Grundlagen aufgezeigt, auf die die probabilistische Bruchmechanik basiert.

Das Auftreten eines Ereignisses  $x$  wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x)$  beschrieben. Wenn diese nur positive Werte annimmt, ist die Formel für die Wahrscheinlichkeitsverteilung:

$$F(x) = \int_0^x f(\bar{x}) d\bar{x} \quad 4-1$$

Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit  $P$  festgelegt, dass eine nichtnegative Zufallsgröße  $X$  in einem bestimmten Intervall  $0 \leq X \leq x$  liegt:

$$P(X \leq x) = F(x) \quad 4-2$$

$P$  kann dabei im Bereich von 0 bis 1 liegen, also gilt:

$$P(X < \infty) = \int_0^{\infty} f(x) dx = 1$$

$$P(X > x) = 1 - F(x) \quad 4-3$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Mittelwert  $\langle X \rangle$  und die Varianz  $varX$  (oder auch Streuung genannt) sind folgendermaßen festgelegt:

$$\langle X \rangle = \int_0^{\infty} xf(x) dx = \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx \quad 4-4$$

$$varX = \int_0^{\infty} [x - \langle X \rangle]^2 f(x) dx$$

Aus der Wurzel der Varianz ergibt sich die Standardabweichung  $\sigma = \sqrt{varX}$ .

### **Funktionen für die Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsdichten oder -verteilungen**

Für die Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsdichten oder -verteilungen können verschiedenste Funktionen angewendet werden von denen im Folgenden einige aufgezeigt werden.

## Normalverteilung

Zum einen ist die Normalverteilung (auch Gauß'sche Glockenkurve genannt) mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  zu nennen. Durch sie können  $K_{Ic}$ -Werte,  $J_c$ -Werte und andere Werkstoffparameter beschrieben werden.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 4-5$$

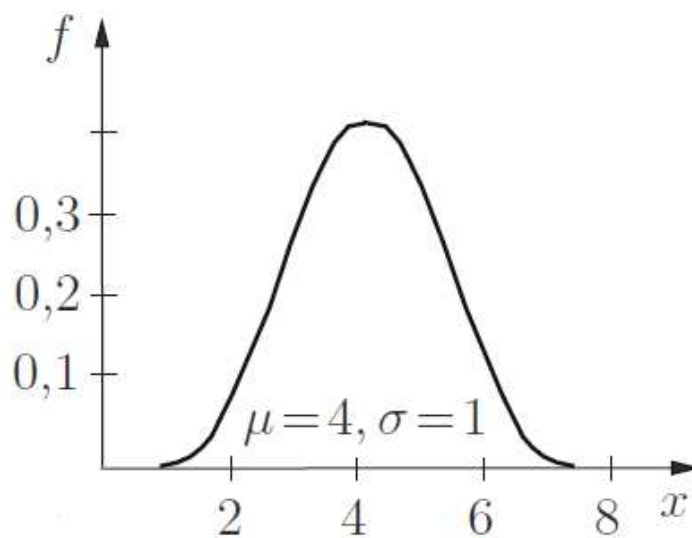


Abbildung 10: Normalverteilungsdichte [34]

## Lognormalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung, oder auch Lognormalverteilung genannt, wird angewendet um veränderbare Belastungen, Risslängen- und Defektverteilungen zu beschreiben. Dabei ist der Erwartungswert  $\langle X \rangle = e^{\mu+\sigma^2/2}$  und die Streuung  $varX = e^{2\mu+2\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$ .

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 4-6$$



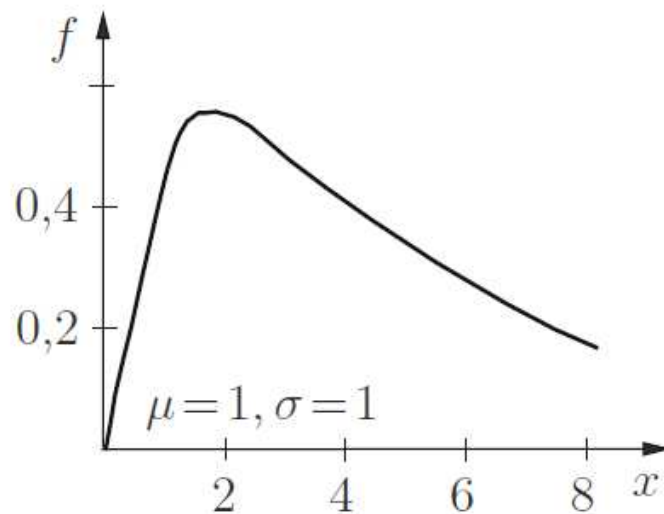


Abbildung 11: Lognormalverteilungsdichte [34]

## Weibull-Verteilung

Das Weibull-Bruchkonzept, welches nach dem schwedischen Wissenschaftler Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (1887 – 1979) benannt wurde, beschreibt ein Konzept, bei dem das Versagen eines Bauteils darauf zurückzuführen ist, dass sein schwächstes Glied versagt. Mit diesem Modul lässt sich das Streuverhalten beim Ausfall von keramischen oder spröden Bauteilen mathematisch beschreiben. Dabei ist wichtig, dass es nur einen einzigen Fehlertyp im Bauteil geben darf, welcher als Gefügeinhomogenität beschrieben wird. Grundlage zur Beschreibung des Problems ist eine Extremwertverteilung – die sogenannte Weibull-Verteilung.

Durch Anpassung der Weibull-Verteilung wird ermöglicht, sie in eine Exponentialverteilung oder eine Normalverteilung umzuwandeln. Hauptsächlich wird die Weibull-Verteilung jedoch dazu verwendet die Versagenswahrscheinlichkeit von keramischen oder spröden Bauteilen mathematisch zu beschreiben.

Bei Kenntnis über die Verteilungsparameter wird es möglich einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Belastungen und der Bruchwahrscheinlichkeit abzuleiten. Außerdem legt die Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % ein Festigkeitsniveau fest.

Das Weibull-Modul  $m$  definiert die Festigkeitsstreuung. Je höher der Weibull-Modul, desto homogener (Verteilung der Defekte) ist der Werkstoff. [34]

Grundlage für die Bestimmung der Parameter ist meistens der Vierpunkt-Biegeversuch, da dieser bei spröden Werkstoffen weniger aufwändig ist.

Die Weibull-Verteilung ermöglicht es Defektverteilungen, Risslängen sowie Ermüdungsvorgänge näherungsweise abzubilden. [35]

Wahrscheinlichkeitsdichte und Wahrscheinlichkeitsverteilung sind für sie wie folgt definiert:

$$f(x) = \lambda \alpha x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, \quad F(x) = 1 - e^{-\lambda x^\alpha} \quad 4-7$$

Mittelwert und Varianz ergeben sich dabei zu:

$$\langle X \rangle = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\lambda^{1/\alpha}}, \quad \text{var}X = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^2}{\lambda^{2/\alpha}} \quad 4-8$$

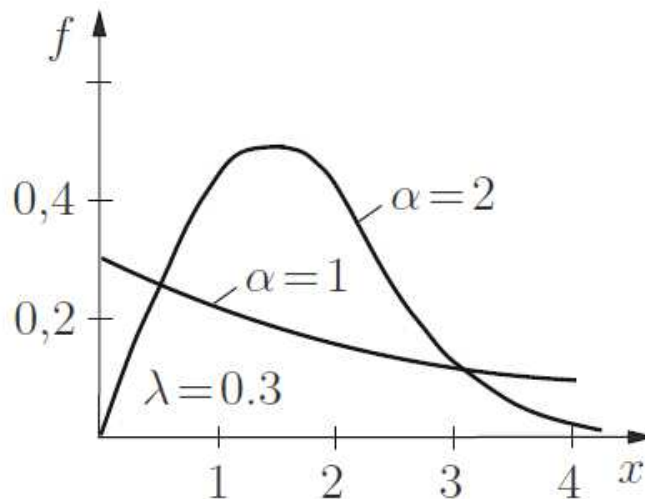


Abbildung 12: Weibull-Verteilungsdichte [34]

$\Gamma$  stellt dabei die Gammafunktion dar.

Anwendung findet die Weibull-Verteilung vor allem bei Ermüdungsvorgängen sowie bei der Erfassung von Rissgrößen und Defektverteilungen in spröden Materialien. Wenn  $\alpha = 1$  ist, wird die Weibull-Verteilung auch Exponentialverteilung genannt.

## Gammaverteilung

Die Gammaverteilung wird im Folgenden aufgezeigt. Für sie gelten  $\langle X \rangle = \alpha/\lambda$  und  $\text{var}X = \alpha/\lambda^2$ . Sie wird ebenfalls zur Näherung der Defektgrößenverteilung herangezogen.

$$f(x) = \lambda \frac{(\lambda x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\lambda x} \quad 4-9$$

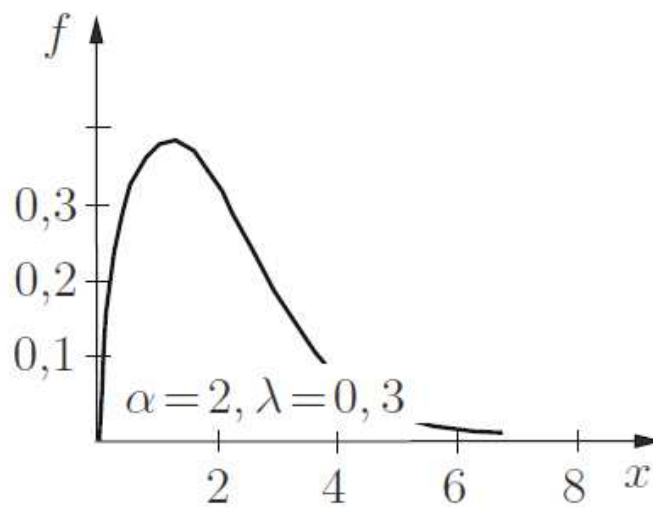


Abbildung 13: Gammaverteilungsdichte [34]

Lognormalverteilung, Weibull-Verteilung und Exponentialverteilung sind unsymmetrisch und eignen sich aus diesem Grund besser für eine Charakterisierung versagensrelevanter Größen als es bei der Normalverteilung der Fall ist. [34]

## 4.3 Bruchwahrscheinlichkeit

Betrachtet wird ein isotropes, sprödes Material, welches unter einer einachsigen, homogenen Spannung  $\sigma$  steht. Es besitzt innere Defekte (z.B. Mikrorisse) aber keine makroskopischen Risse. Die Voraussetzung für die Defekte ist, dass sie inhomogen im Material verteilt sind. Eine weitere Annahme ist, dass das Bauteil versagt, sobald sich nur einer dieser Mikrorisse ausbreitet. Grundlage für diese Aussage ist, dass sich die Mikrorisse nur bei einer Zugspannung ausbreiten.

Mit  $F^*(V)$  wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass es bei einer Zugspannung  $\sigma$  in einem beliebigen Volumen  $V$  kein kritischer Defekt vorhanden ist. Dementsprechend ist die Wahrscheinlichkeit eines anderen Volumens  $V_1$  (das  $V$  nicht enthält)  $F^*(V_1)$ . Wenn die Ereignisse  $V$  und  $V_1$  unabhängig voneinander sind, dann ist die Wahrscheinlichkeit das kein kritischer Defekt in  $V + V_1$  auftritt:

$$F^*(V + V_1) = F^*(V)F^*(V_1) \quad 4-10$$

Bei der Ableitung mit als konstant angenommenen  $V_1$  und anschließender Division durch die oben stehende Gleichung erhält man:

$$\frac{dF^*(V + V_1)}{dV} = \frac{dF^*(V)}{dV} F^*(V_1), \quad \frac{\left[ \frac{dF^*(V + V_1)}{dV} \right]}{F^*(V + V_1)} = \frac{\left[ \frac{dF^*(V)}{dV} \right]}{F^*(V)}$$

Bzw.

$$\frac{d}{dV} \ln[F^*(V + V_1)] = \frac{d}{dV} \ln[F^*(V)] = -c$$

Die Konstante  $c$  ist dabei nur von der Spannung abhängig:  $c = c(\sigma)$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass kein kritischer Defekt auftritt erhält man durch Integration unter Berücksichtigung von  $F^*(0) = 1$ .

$$F^*(V) = e^{-cV} \quad 4-11$$

Das Pendant dazu ist die Wahrscheinlichkeit, dass in  $V$  ein kritischer Defekt auftritt  $F(V) = 1 - F^*(V) = 1 - e^{-c(\sigma)V}$ . Da jedoch ein einziger kritischer Defekt zum Bruch führt, ist die Bruchwahrscheinlichkeit (probability of failure):

$$P_f = 1 - e^{-c(\sigma)V} \quad 4-12$$

Daraus folgt, dass sich die Bruchwahrscheinlichkeit bei konstantem  $c$  (und damit konstantem  $\sigma$ ) mit steigendem Volumen erhöht. Logischer Weise sinkt dadurch die Überlebenswahrscheinlichkeit (probability of survival)  $P_s = 1 - P_f = e^{-cV}$  mit zunehmenden Volumen.

Da in der Gleichung die Natur der Defekte nicht näher beschrieben ist, kann es sich dabei um Mikrorisse oder Spannungskonzentrationen handeln. Bei flächigen oder

stabförmigen Bauteilen kann das Volumen durch die Fläche oder die Länge ersetzt werden.

Durch Vergleich mit 4-7 (oder gängigen Verteilungsfunktionen) erkennt man, dass 4-12 bei festem  $c$  eine Exponentialverteilung darstellt.

Die Aussage, die durch die Formel der Bruchwahrscheinlichkeit 4-12 getroffen wird, ist mit der Theorie des schwächsten Kettengliedes zu vergleichen, bei der die Kette an der schwächsten Stelle reißt, sobald dort die Zugfestigkeit zu hoch ist.

Für  $c(\sigma)$  muss nach Weibull der empirische Ansatz

$$c(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{V_0} \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m & \text{für } \sigma > \sigma_u \\ 0 & \text{für } \sigma \leq \sigma_u \end{cases} \quad 4-13$$

eingeführt werden.

$V_0$  und  $\sigma_0$  sind die Normierungsgrößen und  $\sigma_u$  die Schwellenspannung. Unter dieser Schwellenspannung ist die Bruchwahrscheinlichkeit Null. Zur Vereinfachung wird die Schwellenspannung  $\sigma_u$  Null gesetzt. Der Exponent  $m$  bezeichnet das vom Material abhängigen Weibull-Modul.

Einsetzen von 4-13 in 4-12 ergibt:

$$P_f = F(\sigma) = 1 - \exp \left[ - \frac{V}{V_0} \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad 4-14$$

Hier hat das Volumen  $V$  einen festen Wert.

Obwohl die Formel 4-14 nur für den homogenen einachsigen Spannungszustand gilt, kann sie auf den inhomogenen verallgemeinert werden. Um dies zu erreichen, wird das Volumenelement  $\Delta V_i$  angewendet in dem die Spannung  $\sigma_i$  konstant ist:  $c_i = c(\sigma_i)$

Daraus folgt:

$$F^*(\sum \Delta V_i) = e^{-c_1 \Delta V_1} e^{-c_2 \Delta V_2} e^{-c_3 \Delta V_3} \dots = e^{-c_i \Delta V_i}$$

Es handelt sich dabei um die Wahrscheinlichkeit dafür, dass in einer Summe von Volumenelementen mit jeweils unterschiedlicher Spannung kein kritischer Defekt

vorkommt. Mit Hilfe der Grenzwertbildung ergibt  $F^*(V) = \exp[-\int cdV]$ , und für die Bruchwahrscheinlichkeit erhält man durch 4-13:

$$P_f = F(\sigma) = 1 - F^* = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{V_0} \int_V \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad 4-15$$

[34]

## 4.4 Bruchspannung

Wenn sich ein Körper unter dem Einfluss einer homogenen Zugkraft befindet, ist  $F(\sigma)$  durch 4-14 definiert. Daraus ergibt sich, dass diese beiden Werte vom Volumen des Werkstückes abhängig sind. Daher ergibt sich beim selben Material und unterschiedlichen Volumen folgender Zusammenhang für die mittlere Bruchspannung (also die Zugfestigkeit) und die Streuung:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = \langle \sigma \rangle &= \sigma_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{m}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) , \\ \text{var} \sigma &= \sigma_0^2 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{m} \right) - \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad 4-16$$

Aus diesem Zusammenhang wird ersichtlich, dass diese Größen vom Volumen abhängig sind. Bei dem selben Material erhält man also:

$$\frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{m}} , \quad \frac{(\text{var} \sigma)_1}{(\text{var} \sigma)_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{2}{m}} \quad 4-17$$

Wenn beispielhaft das Verhältnis  $V_2/V_1 = 5$  und  $m = 2$  eingesetzt wird, ergeben sich die Werte  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_2 = 2,24$  und  $(\text{var} \sigma_1)/(\text{var} \sigma_2) = 5$ . Dies bedeutet, dass das kleinere Volumen  $V_1$  eine mehr als doppelt so hohe Bruchfestigkeit aufweist als  $V_2$ . Die Streuung ist allerdings bei dem kleinen Volumen fünfmal größer als bei dem größeren Volumen. Durch die Formel 4-17 lässt sich das Weibull-Modul bestimmen, indem für unterschiedliche Volumina die Bruchspannung bestimmt wird.

Betrachtet wird nun der Einfluss, der durch einen veränderlichen Spannungszustand in das Werkstück eingebracht wird. Angenommen wird ein Balken der Länge  $l$  mit einem Rechteckquerschnitt bei konstantem Biegemoment. Die Spannung verteilt sich über die

Balkenhöhe durch  $\sigma(z) = \sigma_B 2z/h$ , wobei  $\sigma_B$  die maximale Spannung am Rand ist. Beim Einsetzen in 4-15 erhält man für  $V = lbh$  und unter der Voraussetzung, dass über den Zugbereich integriert wird, weil im Druckbereich die Defekte keine Wirkung aufweisen.

$$P_f = F(\sigma_B) = 1 - \exp \left[ -\frac{V}{V_0} \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_0} \right)^m \frac{1}{2(m+1)} \right] \quad 4-18$$

Mittlere Bruchspannung und Streuung für den Fall der Biegung ergeben sich aus 4-7 zu:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_B = \langle \sigma_B \rangle &= \sigma_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{1}{m}} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) [2(m+1)]^{\frac{1}{m}} \\ \text{var } \sigma_B &= \sigma_0^2 \left( \frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{m}} \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{m} \right) - \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \right]^2 \right\} (2(m+1))^{\frac{2}{m}} \end{aligned} \quad 4-19$$

Zu sehen ist, dass sich die Abhängigkeit von Volumen im Vergleich zu 4-16 nicht verändert. Die Bruchfestigkeit und die Streuung sind größer als bei der reinen Zugbeanspruchung.

$$\frac{\bar{\sigma}_B}{\bar{\sigma}_Z} = [2(m+1)]^{\frac{1}{m}}, \quad \frac{\text{var } \sigma_B}{\text{var } \sigma_Z} = [2(m+1)]^{\frac{2}{m}}$$

Beispielsweise ergibt sich bei gleichen Werten für die Geometrie und ein Weibull-Modul  $m = 5$  das Verhältnis von  $\sigma_B/\sigma_Z = 1,64$ . [34]

## 4.5 Verallgemeinerung für realitätsbezogene Problemstellungen

Verallgemeinerungen des Weibull'schen Bruchkonzeptes lassen sich für mehrere Anwendungsbereiche durchführen. Es ist möglich das Bruchkonzept auf Druckspannungen zu erweitern oder auf mehrachsige Spannungszustände – um nur einige Möglichkeiten zu nennen.

## 4.6 Übertragung auf die Problemstellung

Der Vorgang des Lötens, der notwendig ist, um die Solarzellenverbinder an den Busbars der Solarzelle anzubringen, bringt Spannungen in den Wafer der aus Silizium besteht.

Silizium ist ein sehr sprödes Material, welches in seiner Bruchfestigkeit stark streut. Durch die FEM wird es möglich die Bruchwahrscheinlichkeit für die vom Lötprozess eingebrachten Spannungen zu berechnen. Da die Belastungen auf den Wafer nicht einheitlich sind und sich damit die Spannungen unterschiedlich verteilen, handelt es sich um einen inhomogenen Spannungszustand. Dadurch wird es notwendig die Formel

$$P_f = F(\sigma) = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{V_0} \int_V \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad 4-20$$

zu verwenden, welche nach 4.3 auch auf Flächen angewendet werden kann. Bei der späteren Berechnung wird zwischen den Flächen der Ober- und Unterseite des Wafers unterschieden. Dies ergibt die Formel:

$$P_f = F(\sigma) = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{A_0} \int_A \left( \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m dA \right] \quad 4-21$$

$A_0, \sigma_0$  stellen die Normierungsgrößen dar.

Wenn  $\sigma_u = 0$  gesetzt wird und für die Normierungsgröße  $A_0 = 1$ , weil es sich hierbei um die Einheitsfläche handelt, vereinfacht sich die Formel:

$$P_f = 1 - \exp \left( - \int_A \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dA \right) \quad 4-22$$

Da nur Zugspannungen zum Ausfall führen ergibt sich die Bruchwahrscheinlichkeit eines Flächenelementes zu:

$$P_f = 1 - \exp \left( - \int_A \left( \frac{\sigma^+}{\sigma_0} \right)^m dA \right) \quad 4-23$$

Wobei  $\sigma^+$  nichtnegativ ist.



## PIA-Modell

Durch das PIA-Modell (principle of independent action) wird der Integrand der Formel 4-20 für das betrachtete Volumen  $V$  einer Volumeneinheit folgendermaßen beschrieben:

$$\psi = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^m + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0}\right)^m + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_0}\right)^m \quad 4-24$$

Auf die Formel 4-21 bezogen ergibt sich für den zweidimensionalen Raum:

$$\psi = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^m + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_0}\right)^m \quad 4-25$$

Dieser Ansatz ist nur möglich, weil die Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  unabhängig voneinander in ihrer Hauptrichtungen wirken. Die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit wird daher durch das Produkt der Überlebenswahrscheinlichkeiten in den einzelnen Richtungen berechnet. Anwendung findet das PIA-Modell vor allem bei spröden Werkstoffen, wobei es jedoch nicht die Herkunft des Versagens beschreibt. [36]

Im Abschnitt 2.3.1 wurden die spröden Eigenschaften von Silizium angesprochen. Dies macht es notwendig für das Versagen des Siliziums die Hauptspannungshypothese und für die erweiterte Bruchwahrscheinlichkeit das PIA-Modell anzunehmen. Daraus erschließt sich, dass die in der Bruchwahrscheinlichkeit  $P_f$  aufgeführte Spannung  $\sigma$  bzw.  $\sigma^+$  durch die beiden Hauptspannungen in der Ebene ersetzt werden. Es ergibt sich die erweiterte Bruchwahrscheinlichkeit:

$$P_f = 1 - \exp\left(-\int_A \left(\frac{\sigma_1^+}{\sigma_0}\right)^m + \left(\frac{\sigma_2^+}{\sigma_0}\right)^m dA\right) \quad 4-26$$

Wird diese Formel mit  $\left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max}}\right) = 1$  erweitert, folgt daraus in der Formel die effektive Fläche  $A_E$ :

$$P_f = 1 - \exp \left( - \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m \underbrace{\int_A \left( \frac{\sigma_1^+}{\sigma_{\max}} \right)^m + \left( \frac{\sigma_2^+}{\sigma_{\max}} \right)^m dA}_{= \text{Effektive Fläche } A_E} \right) \quad 4-27$$

Vereinfacht lautet die Formel dann:

$$P_f = 1 - \exp \left( -A_E \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m \right) \quad 4-28$$

### Effektive Fläche $A_E$

Als effektive Fläche  $A_E$  wird ein ebener Bereich bezeichnet, der unter Zugspannung ( $\sigma > 0$ ) steht. Es handelt sich hierbei um eine gewichtet Darstellung. Das Gewicht ist dabei die maximal existierende Hauptspannung  $\sigma_{\max} := \max(\sigma_1(x, y))$

$$A_E := \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left( \frac{\sigma_1(x, y)^+}{\sigma_{\max}} \right)^m + \left( \frac{\sigma_2(x, y)^+}{\sigma_{\max}} \right)^m dy dx \quad 4-29$$

Anschließend wird eine Gesamtbruchwahrscheinlichkeit ermittelt.

Benötigt werden dazu die Hauptspannungen in den jeweiligen Volumen- oder Flächenelementen. Durch die Nutzung der FEM ist der Wafer in räumliche Elemente bzw. flächige Elemente unterteilt die als Volumen- oder Flächenelemente gelten können.

Bei der Verwendung von Flächenelementen für die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit ist darauf zu achten, dass nur Spannungen verwendet werden können, die parallel zur Ebene liegen.

## 5 Stand der Wissenschaft

Um die Notwendigkeit der Untersuchungen darzustellen, die in dieser Arbeit getätigt werden, wird zunächst ein kurzer Überblick über schon bestehende Forschungen geliefert. Die Forschungen haben sich vor allem mit den mechanischen und thermomechanischen Verhalten von Wafern, Solarzellen oder ganzen Solarmodulen befasst.

### **THE INFLUENCE OF MICRO CRACKS IN MULTI-CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS ON THE RELIABILITY OF PV MODULES**

Die Untersuchungen von Grunow aus dem Jahre 2005 befassen sich mit Mikrorissen in mono- und polykristallinen Siliziumwafern. Dabei werden laminierte Siliziumwafer unterschiedlicher Dicke einem Biegetest unterzogen, der zur Ausbreitung oder zum Entstehen der Mikrorisse führt. Für die Detektierung der Mikrorisse werden die Wafer im Infrarotbereich untersucht, wobei an den Mikrorissen eine Reflexion auftritt. Des Weiteren wird verglichen, wie sich die Leistungsabnahme nach dem Biegetest verhält.

Ergebnisse:

- Mehrere Kunststoffschichten des Laminates verbessern bei dünnen Wafern die mechanischen Eigenschaften
- Mehrere Kunststoffschichten verbessern die mechanische Widerstandskraft (für dünne Zellen)
- Bestimmung der kritischen Risslänge bei einer bestimmten Risstiefe für unterschiedlich dicke Wafer
- Leistungsabnahme proportional zur aufgebrachten Biegelast, aber nicht zur Anzahl der Wiederholungen
- Unterteilung der Position und Ausrichtung der Risse (Abbildung 14) und ihr Einfluss auf die Leistung → Risse längs der Busbars führen zur größten Leistungsabnahme, weil dadurch große Teile der Solarzelle elektrisch isoliert werden [24]

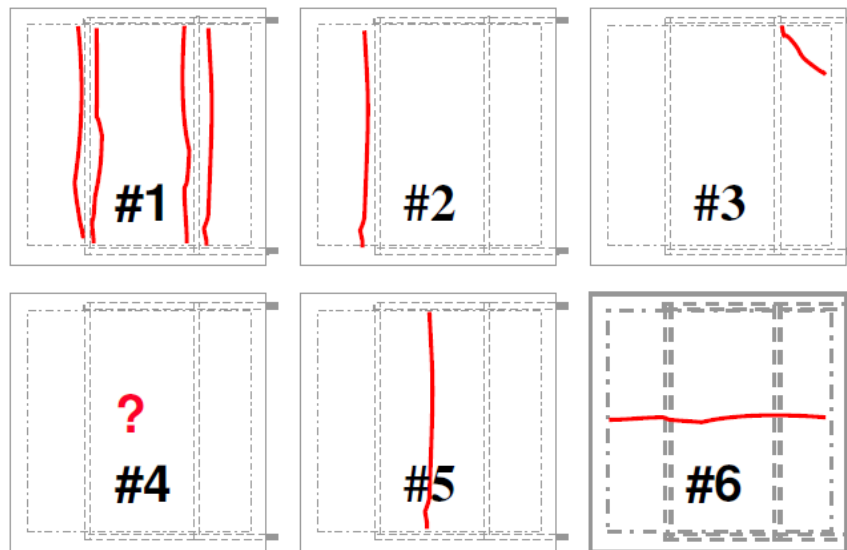


Abbildung 14: Position und Ausrichtung der Risse in Solarzellen [24]

Kritikpunkte:

Analysen wurden ohne Aluminiumrückseitenkontakt durchgeführt damit die Infrarotstrahlung zur Untersuchung der Risse verwendet werden kann

### **Interdependency of mechanical failure rate of encapsulated solar cells and module design parameters**

Dieser Forschungsbericht geht auf die Auswirkungen des Einkapselungsmaterials, der Glasschicht und den Rahmen in Bezug auf die Spannungen ein. Aus diesem Grund wurde ein FEM-Modell angefertigt, in dem alle Teile eines Solarmoduls berücksichtigt wurden.

Dieses Modell war die Grundlage für Biegetests und Parameterstudien. Grund für die Untersuchungen sind die immer dünner werdenden Siliziumwafer, die bei der Solarzellenherstellung Verwendung finden.

Ergebnisse:

- Große Spannungen werden beim Laminationsprozess in die Solarzelle geleitet
- Solarzellen werden bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedlich stark belastet, weil das Einkapselungsmaterial temperaturabhängige Eigenschaften in der Festigkeit aufweist

- In der Mitte des Moduls neigen die Solarzellen beim Biegen dazu parallel der Busbars zu brechen
- Design des Moduls hat einen Einfluss auf die Versagensrate
- Verformung bei weicheren Rahmen und Einkapselung größer
- Maximale Spannung in Zellen größer bei steiferen Abschnitten (an den Ecken und Kanten des Rahmens)
- Verdoppelung der Last führt zu einer 100 – 300 mal so großen Versagenswahrscheinlichkeit
- Je weicher das Einkapselungsmaterial ist, desto höher ist die Überlebenswahrscheinlichkeit der Solarzellen
- Dicke Schicht des Laminates besser für Haltbarkeit der Solarzelle [37]

Kritikpunkte:

Busbars und Ribbon vernachlässigt

### **CRACK STATISTIC OF CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES**

Bei dieser Forschung wurde der Einfluss des Transportes auf die Bildung von Rissen analysiert.

Ergebnisse:

- Bestimmung der Eigenfrequenz der PV-Module
- Mechanische Kräfte beim Transport größte Ursache für Ausbreitung von Rissen [38]

### **Mechanical investigations on metallization layouts of solar cells with respect to module reliability**

In dieser Arbeit sind die unterschiedlichen Metallisierungs-Layouts von eingekapselten Solarzellen Gegenstand der Untersuchung. Zunächst wurde ein FEM-Modell erstellt, welches den Lötprozess abbildet. Die Spannungsergebnisse des Lötprozesses wurden dann in ein Modell übertragen, bei dem eine laminierte Solarzelle einem 4-Punkt-Biegeversuch unterzogen wurde. Die Durchführung der Biegeversuche erfolgte in zwei Konfigurationen, einmal parallel und einmal orthogonal zu den Busbars.

Ergebnisse:

- Die Spannungen vom Lötten sind vergleichsweise klein, aber bestimmen die Bruchcharakteristik
- Spannungen nach dem Lötten großflächig nahe Null und um die Busbars hohe Spannungen
- Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Silizium
- Spannungen nach dem Lötten oben 2,5 mal höher als auf der Unterseite
- Die Bruchwahrscheinlichkeit wird beeinflusst von der Biegerichtung und der Metallisierungsanordnung
- Biegung hat mehr Einfluss auf die inneren Spannungen als das Lötten [39]

Schwächen:

- Lot zu dick (0,1 mm)
- Abkühlung konstant 2,7 K/s und homogen von 183 °C auf 20 °C
- Nur Abkühlung beim Lötprozess und keine Erwärmung

**Risse in Solarzellen - Untersuchung der Rissentstehung, des Rissfortschritts in eingebetteten Solarzellen**

Diese Forschung befasst sich mit der Untersuchung der Rissentstehung und des Rissfortschritts in eingebetteten Solarzellen. Als Hilfsmittel dient dabei die Elektrolumineszenz, bei der elektromagnetische Strahlung beim Anlegen einer elektrischen Spannung abgegeben wird. Die Analyse der Elektrolumineszenz wird hierbei nach jedem Fertigungsschritt angewendet, um das Risswachstum zu verifizieren. Durch die Temperaturänderungen in den einzelnen Fertigungsschritten und die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten entstehen mechanische Spannungen die jeweils zu weiteren Rissen oder zur Ausbreitung bestehender Risse führen. Außerdem wurde ein FEM-Modell erstellt, welches die Solarzelle bei der Abkühlung von der Laminierungstemperatur darstellt.

Ergebnisse:

- Quantifizierung des Risswachstum bei jedem Prozessschritt
- Laminierungsprozess führt zum größten Risswachstum

- FEM-Modell ergab, dass im vorderen Bereich der Busbars nach dem Abkühlen von der Laminierungstemperatur die größten Spannungen entstehen [40]

## **SOLDERING INDUCED DAMAGE TO THIN SI SOLAR CELLS AND DETECTION OF CRACKED CELLS IN**

In dieser Arbeit werden die Schäden untersucht, die durch das Löten induziert werden. Es wird dabei auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Materialien eingegangen, die beim Lötprozess zu mechanischen Spannungen führen und damit zur Ausbreitung oder zur Bildung von Rissen. Risse entstehen demnach vor allem an den Lötstellen.

Zur Analyse wurden zwei verschiedene Charakterisierungen angewendet. Bei der ersten wird die Kraft gemessen, die notwendig ist, um den aufgelöteten Solarzellenverbinder abzuziehen. Diese Methode weist jedoch nur eine geringe Korrelation der Kraft, die benötigt wird um den Solarzellenverbinder abzuziehen, und der Ausfallrate der Solarzellen auf.

Bei der zweiten Analyseverfahren wird die Solarzelle direkt neben dem Busbar eingespannt und der überstehende Teil nach unten gedrückt bis zum Bruch der Solarzelle. Die Korrelation ist hierbei größer als bei der ersten Methode.

Ergebnisse:

- Solarzellen sind schwächer, wenn sie mit der Sonnenseite nach oben getestet werden
- Eine normale Temperaturreduzierung beim Lötprozess weist keine negativen Auswirkungen auf die Bruchwahrscheinlichkeit aus
- Die Zusammenführung des Tabber- und des Stringer-Prozesses zum Tabber-Stringer-Prozess verringert das Aufkommen von schwachen Zellen auf circa ein Drittel
- Austauschmaterialien zum Kupfer der Solarzellenverbinder mit einem geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten, jedoch mit einer höheren Zugfestigkeit führen zu einer erhöhten Zahl schwacher Zellen
- Die Auswahl der Silberpaste beeinflusst die Zugfestigkeit beim Abziehen der Solarzellenverbinder
- Frühere Generationen von Solarzellenverbinder steigern den Anteil schwacher Zellen deutlich

Des Weiteren wurde ein Biegetest mit laminierten aber nicht gerahmten Solarzellen durchgeführt mit anschließender Elektrolumineszenz-Analyse zur Rissdetektierung. Ein FEM-Modell wurde zusätzlich modelliert um die Einflüsse der einzelnen Schichten aufeinander zu verstehen.

Ergebnisse:

- Auswirkung der verschiedenen Solarzellenverbinder nach dem Biegetest auf die Leistung gering und gleich

Weiterführende Fragen:

Punktlöten für einen kleineren Einflussbereich oder gleichmäßige Verteilung der Spannung auf einen größeren Einflussbereich?

Wie weich können die Solarzellenverbinder gemacht werden und wie hängt dies von der Korngröße ab?

***Hängen die thermischen Spannungen von der Abkühlgeschwindigkeit ab?***

***Wie sieht die Spannungsverteilung nach dem Löten aus?***

***Wie sind die Spannungsverteilungen bei verschiedenen geometrischen Abmaßen der Solarzellenverbinder?***

[17]



## **Mechanical and Thermo-Mechanical Assessment of Encapsulated Solar Cells by Finite-Element-Simulation**

In dieser wissenschaftlichen Arbeit werden die mechanischen und thermomechanischen Einflüsse von eingebetteten Solarzellen untersucht. Das Herzstück der Analyse ist dabei ein FEM-Modell von drei Solarzellen, die über die Solarzellenverbinder miteinander verbunden und gemeinsam verkapselt sind. Mit Hilfe dieses Minimodells eines kompletten PV-Moduls werden Parameterstudien für den Abkühlprozess des Laminationsprozesses durchgeführt und eine Windlast aufgegeben.

### Ergebnisse:

- Mechanisches Verhalten nicht ausschließlich von Glas abhängig
- Jede Schicht trägt zur Steifigkeit des Systems bei
- Mechanische Eigenschaften der EVA-Folie stark temperaturabhängig
- Ausbeulung größer bei dickerer Polymerschicht
- Bei höheren Temperaturen kann die Spannung durch eine dicke Schicht Polymer zwischen Glas und Silizium reduziert werden
- Dünnere Zellen → höhere Spannungen

## 6 Klassifizierung von automatisierbaren Lötverfahren

### 6.1 Allgemein Löten

#### Definition

*„Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von metallischen und nichtmetallischen Grundwerkstoffen, wobei eine schmelzflüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten mit einem Fertiglot) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten mit einem Reaktionslot) entsteht. Im Unterschied zum Schweißen wird die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe nicht erreicht. Grundwerkstoff und Zusatzwerkstoff (Lot) können in ihrer chemischen Zusammensetzung sehr unterschiedlich sein.“ [42 - S. 259]*

nach DIN ISO 857-2

Vorteile des Lötens gegenüber dem Schweißen:

- Verbinden verschiedenartiger Werkstoffe
- Verbinden nichtmetallischer Werkstoffe (z.B. Glas, Keramik, Sinterstoffe, Hartmetalle)
- Geringe Wärmeeinbringung, geringer Verzug
- Gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit der Lötstellen
- Lötstellen sind zum Überwiegenden Teil plastisch verformbar
- Herstellen mehrerer Lötstellen ist gleichzeitig möglich
- Kein Aufschmelzen des Grundwerkstoffes

Nachteile gegenüber dem Schweißen:

- Mögliche Korrosionsgefahr durch Potentialunterschiede zwischen Lot und Grundwerkstoffen
- Zunehmende Festigkeitseinbuße mit steigender Einsatztemperatur
- Mögliche Festigkeitsminderung durch Flussmitteleinschlüsse [42]

*„Wenigstens ein Legierungselement des Lotes muss mit mindestens einem Legierungselement des Grundwerkstoffes einen Mischkristall, ein Eutektikum oder eine intermetallische Phase bilden.“ [42 - S. 260]*

## 6.2 automatisierbare Lötverfahren

In Zeiten der Globalisierung, in der die Transportkosten eine eher untergeordnete Rolle spielen, ist es von großer Notwendigkeit die Fertigungskosten so gering wie möglich zu halten, um auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig zu bleiben. Aus diesem Grund wird seit den Anfängen der Industrialisierung der Faktor Mensch bei der Produktion immer weiter in den Hintergrund gerückt. Vorrichtungen, Apparate, Maschinen oder Fertigungsstraßen ermöglichen es reproduzierbare Arbeit in teilweise enormen Stückzahlen und kurzer Zeit zu verrichten. Das wiederum senkt die Kosten für einzelne Produkte und hebt somit den Lebensstandard des Durchschnittsmenschen.

In dem folgenden Abschnitt werden aus diesem Grund Lötverfahren untersucht, die automatisierbar sind. Unterschieden wird in zwei Lötverfahren. Einerseits das Verfahren, bei dem flüssiges Lot während des Lötvorgangs auf die Lötstelle aufgegeben wird und das Zweite, bei dem das Lot vorher aufgetragen und beim Löten aufgeschmolzen wird.

## 6.3 Löten durch Auftragen von flüssigem Lot

### 6.3.1 Kolbenlöten

Das bekannteste Lötverfahren ist das Kolbenlöten. Hierbei erfolgt das Abschmelzen des Lotes durch einen manuell oder maschinell geführten LötKolben. Die benötigte Wärmeenergie zum Schmelzen des Lotes wird durch Wärmeübertragung über den elektrisch oder mit Gas beheizten LötKolben gewährleistet.

Die mechanischen, geometrischen und thermischen Eigenschaften des Kolbens und der Lötspitze müssen dabei der Lötaufgabe angepasst sein.

Durch das Lot auf der Lötspitze werden die zu fügenden Bauteile auf Löttemperatur gebracht. Das für den Lötvorgang notwendige Flussmittel wird entweder vor dem Löten aufgebracht oder kontinuierlich über ein sogenanntes Röhrenlot mit Flussmittelfüllung aufgebracht.

Einsatzgebiete:

- Automatisierbar: mechanisiertes Massendlöten in der Elektrotechnik / Elektronik
- Verpackungsfertigung (Konservendose)

### Manuell: Reparaturlöten in der Elektronik / Nachrichtentechnik

- Installationstechnik
- Klempnerei
- Apparatebau

[42]

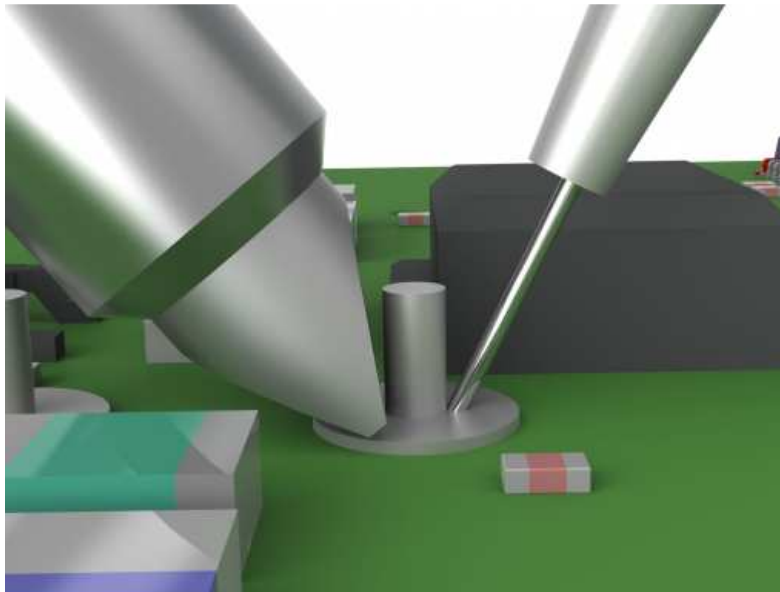


Abbildung 15: Automatisiertes Kolbenlöten [43]

### 6.3.2 Lotbadtauchlöten

Beim Lotbadtauchlöten wird die Löttaufgabe dadurch erfüllt, dass die zu lötenden Teile in ein Lotschmelzbad eingetaucht werden. Die zu fügenden Teile müssen vor dem Löten mechanisch gereinigt, positioniert und mit Flussmittel versehen werden. Beim Eintauchen, der zu fügenden Teile, muss darauf geachtet werden die Eintauchgeschwindigkeit so zu wählen, dass während des Eintauchens die Löttemperatur am Werkstück vorherrscht.

Damit das Lot nicht erstarrt, müssen die Temperatur und das Badvolumen der Lotschmelze der Masse der zu lötenden Teile angepasst sein.

Anwendungsbereiche:

- Kühler- und Behälterbau
- Feuerverzinnen von Drähten, Kabelenden und Bändern

- Fließfertigung von Leiterplatten in der Elektrotechnik

[42]



Abbildung 16: Lotbad für das Lotbadtauchlöten [44]

### 6.3.3 Wellenlöten

Das sogenannte Wellen- oder Schwalllöten ist ein weiteres automatisierbares Lötverfahren zum Fügen von elektrischen Bauteilen. Anders als beim Reflow-Löten wird hier das Lot im flüssigen Zustand auf die zu fügende Stelle aufgebracht. Durch ein Fördersystem werden die Bauteile über eine sogenannte Fluxerwelle gefahren, um das Flussmittel aufzunehmen. Anschließend fahren sie über einen Heizstrahler, der die Bauteile auf die Löttemperatur erwärmt. Gleich darauf folgt die Lötwellen, die das Lot auf die gewünschte Stelle aufträgt. Die Lötwellen wird durch eine Pumpe erzeugt, die das geschmolzene Weichlot durch eine Düse presst. Form und Wirkung der Welle wird hauptsächlich durch die Form der Düse bestimmt.

Nur die Lötstellen berühren bei diesem Verfahren das flüssige Lot, denn eine Lötstopmmaske verhindert, dass das Lot an die falschen Stellen gelangt. [42]

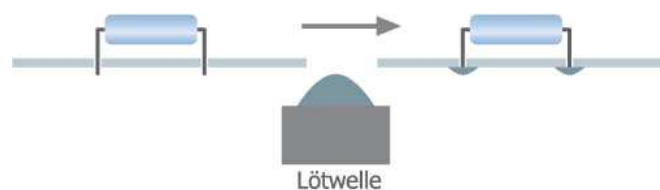


Abbildung 17: Wellenlöten [45]

### 6.3.4 Rollenlöten

Durch angeschwemmtes Lot wird eine Rolle im flüssigen Lot benetzt. Diese wiederum erwärmt die zu lötende Oberfläche, die vorher mit Flussmittel präpariert wurde. Mit Hilfe der Drehung der Rolle wird das Lot auf der Oberfläche verteilt. Eine Gegenrolle drückt von oben gegen die zwischen den Rollen befindenden Werkstücke, die gelötet werden. [46]

### 6.3.5 Flammlöten

Bei diesem Lötverfahren wird die erforderliche Wärmeenergie zum Schmelzen des Lotes durch die Verbrennung von Brenngasen (Azetylen, Propan, Erdgas) zur Verfügung gestellt. Die Lötaufgabe kann entweder durch einen Handbrenner (manuelles Flammlöten) oder durch gezielt angeordnete Brenner (Flammfeldlöten) durchgeführt werden. Beim Flammfeldlöten werden die Lötteile über ein Beförderungssystem durch die Flammfeldzone geführt. Zusätzlich müssen für das Flammfeldlöten einige Voraussetzungen getroffen werden. So ist die Vormontage, das Aufbringen des Flussmittels und des Lotes oder das indirekte Abschmelzen des Lots vom Draht während der Erwärmung, unabdingbar. Die von Flussmittel benetzten Teile dürfen nicht mit den Flammen in Berührung kommen und das Lötteil muss gleichmäßig erwärmt werden. Beim Ansetzen des Lotes darf es nicht direkt mit der Flamme abgeschmolzen werden.

Einsatzgebiete:

Manuell:

- Reparaturarbeiten
- Klempnerei
- Fahrzeugbau
- Goldschmiedearbeiten

Flammfeldlöten:

- Kleinserien- bis Massenfertigung
- Fertigung von Armaturen
- Fahrzeugteile
- Wärmetauscher

- Durchlauferhitzer
- Stahlrohrmöbel

[42]



Abbildung 18: Flammlöten beim Messinglöten [47]

## 6.4 Reflow-Löten

Der Begriff Reflow-Löten stammt vom englischen reflow soldering ab und bedeutet so viel wie Wiederaufschmelzlöten. Es ist ein weit verbreitetes Lötverfahren, welches vor allem in der Elektrotechnik Verwendung findet. Anders als bei Lötverfahren wie dem LötKolbenlöten, Tauchlöten oder Wellenlöten wird hier das Lot in einem Prozessschritt vorher aufgetragen. [48] Dies kann in Form einer Lötpaste geschehen, die durch eine Schablone oder Versorgungseinheit aufgetragen wird. Eine andere Möglichkeit der Bestückung mit dem Lötzinn sind sogenannte Lotformteile [49] (Preforms), wie sie auch beim Auflöten der Kupfer-Ribbons auf die Busbars der Solarzelle zum Einsatz kommen. Bei den Preforms handelt es sich um Lotformteile. Im speziellen Fall der Solarzellenherstellung sind die Lötformteile die mit Lötzinn ummantelten Kupferribbons. Diese werden vor dem Lötprozess auf den Busbars positioniert und durch die Niederhalter der Lötvorrichtung fixiert.

Es gibt viele Möglichkeiten das Lot wieder aufzuschmelzen. Von Bedeutung ist hierbei, dass im Bereich des Lotes die Temperatur über einen längeren Zeitraum hoch genug ist, damit das Lot vollständig aufschmilzt und nach dem Erstarren eine stoffschlüssige Verbindung entstanden ist.

Im Folgenden werden die einzelnen Arten des Reflow-Lötens vorgestellt und erläutert.

### 6.4.1 Mittels Heizplatte / Blocklöten

Bei diesem Lötverfahren wird die zu verbindende Baugruppe auf einer Heizplatte positioniert und erhitzt bis das Lot komplett geschmolzen ist. Dabei erwärmt sich das gesamte Bauteil gleichmäßig. Nach dem eigentlichen Lötprozess wird die Baugruppe von der Heizplatte genommen und kann abkühlen.

Um die Qualität der Lötstelle zu erhöhen, kann der Lötprozess auch im Vakuum stattfinden. So hergestellte Lötstellen sind frei von Lunker und damit stabiler und zuverlässiger.

Des Weiteren ist es möglich im Zusammenhang mit einer Vakuumkammer inerte Gase (z.B. Stickstoff) oder reduzierende Gase (z.B. Wasserstoff) einzusetzen. Eine Plasmaaktivierung im Vakuum ist ebenfalls möglich, damit dem Löten anschließende Prozessschritte zum Säubern von Verunreinigungen entfallen können. [49] [50]

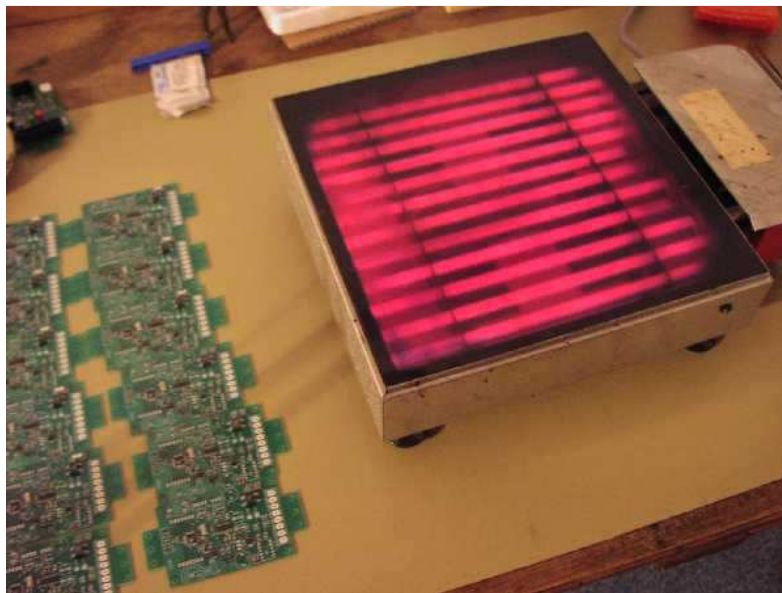


Abbildung 19: Heizplatte zum Löten [51]

### 6.4.2 Widerstandslöten

Direktes oder indirektes Fließen von elektrischem Strom im Lötteil oder in der Lötstelle ist beim Widerstandslöten die Grundvoraussetzung zum Erfüllen der Lötaufgabe. Für das Widerstandslöten wird eine Widerstandsschweißmaschine verwendet, die in ihrer Größe dem zu fügenden Teil angepasst sein muss. Ein Transformator wandelt den Netzstrom in einen starken Wechselstrom mit niedriger Spannung um.

Beim Widerstandslöten kommen Formteile wie Bügel und Stempel zum Einsatz, die einerseits die zu fügenden Bauteile mit dem dazugehörigen Lot zusammenhalten und



dann lokal durch die Widerstandsheizung bis zum Schmelzen aufheizen. Nach dem Abstellen der Heizung wird gewartet bis das Lot erstarrt ist, woraufhin der Stempel wieder abgehoben wird.

Bevorzugte Verwendung der indirekten Erwärmung findet sich bei kleinen Bauteilen (z.B. Auflöten von Hartmetallplättchen). [42]

### **6.4.3 Infrarotstrahler**

Die zu fügende Baugruppe wird in diesem Verfahren in den meisten Fällen durch ein Fördersystem in einen Ofen gefahren. Ein oder mehrere Infrarotstrahler im Inneren des Ofens übernehmen dann den Lötprozess mit Hilfe des physikalischen Effektes der Wärmestrahlung.

Im Ofen können dann entweder mehrere Temperaturzonen nacheinander durchfahren werden, die nötig sind um die Lötaufgabe zu erfüllen, oder die Baugruppe verweilt im Ofen an einer Stelle und das Programm für den Temperaturverlauf wird an Ort und Stelle durchgeführt. Das Löten mit Infrarotstrahlern kann also kontinuierlich oder getaktet durchgeführt werden. Wie beim Kontaktlöten ist es auch bei diesem Verfahren möglich, das Löten im Vakuum durchzuführen.

Ein Nachteil ist jedoch, dass dunkle Bauteile eine höhere Absorption haben als Helle, was eine ungleichmäßige Temperaturverteilung mit sich führt. [52]

### **6.4.4 Vollkonvektions-Reflow-Löten/ Zwangs-Konvektionslöten**

Bei diesem Verfahren wird zunächst Luft auf die gewünschte Temperatur erwärmt und dann durch Düsen auf die zu lötenden Bauteile geführt. Dadurch ist es möglich eine viel gleichmäßigere Temperaturverteilung dem Bauteil aufzugeben als beim Löten mittels Infrarotstrahlung. [53]

### **6.4.5 Laserstrahllöten**

Durch dieses Verfahren ist es möglich die zu lötende Stelle kurzzeitig punktuell mit einem Laserstrahl zu erwärmen. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ein gutes Absorptionsverhalten an der Lötstelle vorliegt. Bei kurzen Wellenlängen ist die Absorption der Strahlung am höchsten. Aus diesem Grund liegt die verwendete Wellenlänge des Laserstrahls nahe am sichtbaren Licht.

Die kurze und punktuelle Erwärmung macht es zu dem Verfahren, welches die geringsten thermischen Belastungen in das Bauteil einbringt. [52] [54]

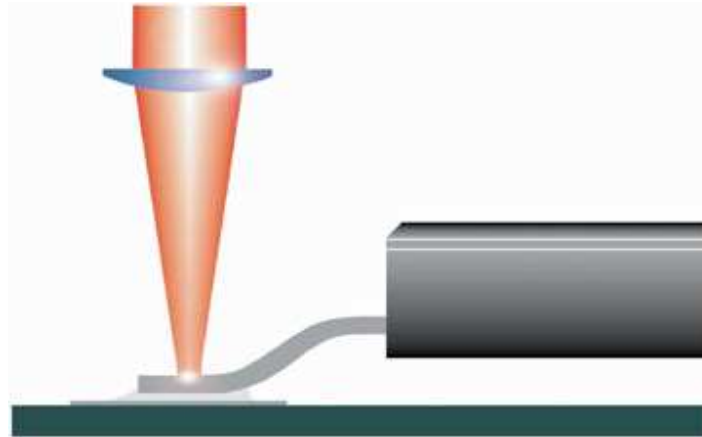


Abbildung 20: Laserstrahllöten [55]

#### 6.4.6 Dampfphasenlöten

Das Dampfphasenlöten nutzt den physikalische Effekt der Phasenänderung von gasförmig zu flüssig. Bei der Kondensation eines Fluides wird Kondensationswärme freigesetzt, was eine schnelle und verlustfreie Wärmübertragung ermöglicht. Der Anstieg der Temperatur kann über ein gesteuertes Eintauchen bestimmt werden. Die Kondensation findet an der Oberfläche des zu lötenden Bauteils statt, bis die Temperatur des Bauteils die des Dampfes erreicht hat. Wenn die kondensierte Flüssigkeit wieder verdampft entsteht eine Atmosphäre aus Schutzgas, die eine Oxidation verhindert.

Nachdem die zu lötende Baugruppe die Dampfzone wieder verlässt, verdampft das restliche Kondensat auf der Baugruppe auf Grund seiner Eigenwärme. Gleichzeitig bewirkt dieser Effekt eine gesteuerte Abkühlung.

Die Fluide, die für diesen Prozess eingesetzt werden können, sind flüssige Polymere, die aus Kohlenstoff, Fluor und Sauerstoff bestehen.

Durch den Kondensationsprozess ist die Temperatur beim Lötprozess unabhängig von der Geometrie der Bauteile.

Es besteht weiterhin die Möglichkeit des Vakuumdampfphasenlöten. Hier wird nach dem Schmelzen des Lotes ein hohes Vakuum in der Kammer herbeigeführt, was dazu führt,

dass gasförmige Einschlüsse aus dem Lot befördert werden und somit die Lötstelle frei von Lunkern ist. [53]

### 6.4.7 Induktionslöten

Mit der Hilfe von elektromagnetischer Induktion wird beim Induktionslöten gearbeitet. Als Primärspule dient dabei ein wassergekühlter Induktor der im Lötteil (Sekundärkreis) Wärme erzeugt. Wärme wird dabei nur in dem Bereich der zu lötenden Teile, die vom Induktor umschlossen sind, durch einen induzierten Wechselstrom erzeugt. Die Wärmeübertragung erfolgt auf Grund der Induktion berührungslos. Prinzipiell lassen sich alle elektrisch leitenden Werkstoffe, sowie Werkstoffe, die erst bei höherer Temperatur elektrisch leitend werden induktiv erwärmen. Diese müssen jedoch bis zu der Temperatur vorgeheizt werden, bei der sie elektrisch leitfähig werden.

Abhängig ist die Erwärmung dabei von der Intensität des Magnetfeldes, dem Abstand von Werkstück und Induktor, den Werkstoffeigenschaften und der Zeit.

Einsatzmöglichkeiten:

- Partielles Löten einfacher gestalteter Bauteile (vor allem rotationsymmetrische)
- Fahrzeugbau (z.B. Stoßdämpfer, Bremsleitungen, Fahrradrahmen)
- Metallindustrie (Hartmetallwerkzeuge, Nähmaschinenteile) [42]



Abbildung 21: Induktionslöten beim selektiven Einzelpunktlöten [56]

Durch eine sinnvolle Einschätzung in Bezug auf den Einwirkungsbereich der Wärme und auf die geforderte Reinheit des Prozesses kann die Auswahl des Lötverfahrens für den Tabber-Stringer-Prozess erfolgen.

## **6.5 Löten in der Solarzellenproduktion**

Im Bereich der Photovoltaik ist es notwendig im Tabber-Stringer-Prozess die Solarzellen seriell durch das Auflöten der Kupfer-Ribbons auf die Busbars der Solarzelle zu verschalten. Dabei muss das Verfahren kostengünstig und wiederholbar durchzuführen sein. Das Fraunhofer CSP nutzt zum Durchführen der Lötaufgabe einen Infrarotstrahler, welcher zum Löten ein Temperaturprofil durchläuft. Die Bestückung des Ofens erfolgt durch ein Förderband auf das die Solarzellen zusammen mit den positionierten Ribbons gelegt werden müssen.

Denkbar für diesen Lötprozess wären jedoch auch andere Lötverfahren aus dem Bereich des Reflow-Lötens. Als geeignet erscheinen zum einen das Laserstrahllöten durch seine geringe thermische Einwirkzone und zum anderen das Induktions- oder Widerstandslöten durch ihre fast nur auf das Lot begrenzte thermische Einwirkung. Das Löten mittels Heizplatte, das Vollkonvektions-Reflow-Löten und das Dampfphasenlöten sind auch durchführbar, jedoch mit einer größeren Wärmeeinflusszone.

## **6.6 Beschreibung des Lötprozesses beim Tabber-Stringer**

Für die Durchführung der Lötaufgabe des Tabber-Stringer Prozesses steht dem Fraunhofer CSP ein sogenannter Handstringer für die Kleinserienfertigung zur Verfügung. Auf diesem Gerät können Solarzellen mit zwei Busbars oder drei Busbars miteinander verbunden werden.

Abbildung 22 zeigt den ersten Prozessschritt. Hierbei wird zuerst eine Solarzelle auf dem Förderband positioniert und dann die Solarzellenverbinder auf die Busbars der Oberseite gelegt. Auf die nach hinten überstehenden Solarzellenverbinder wird anschließend eine weitere Solarzelle gelegt und zwar so, dass die Solarzellenverbinder unter den Busbars der Rückseite liegen. Dieser Vorgang kann so oft wiederholt werden bis die gewünschte Anzahl von Solarzellen zu einem String zusammengefügt ist.

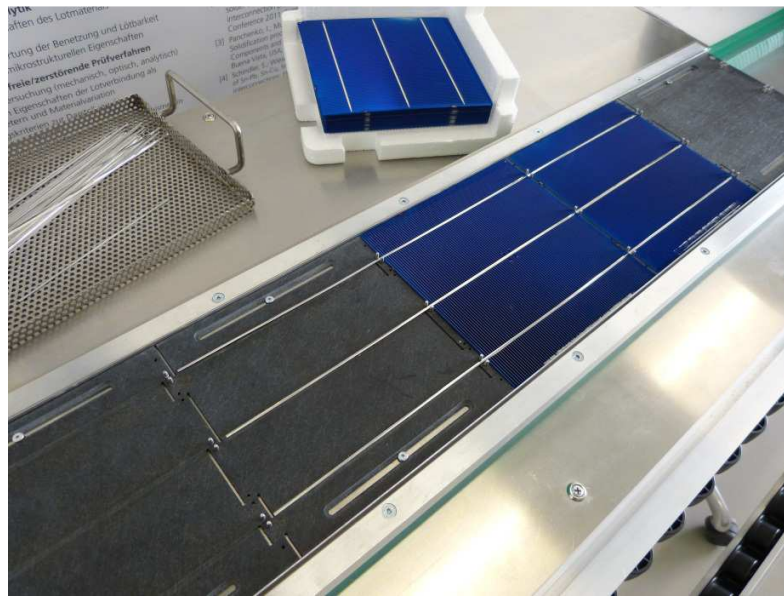


Abbildung 22: Förderband mit aufgelegten Solarzellen

Anschließend fährt das Förderband die Solarzellen in den Ofen (Abbildung 23 und Abbildung 24) und hält dort an. Die Niederhalter fahren nach unten und fixieren mit ein wenig Kraft die Lage der Ribbons. Das Aufheizen durch die Infrarotstrahler kann erfolgen, wobei Temperaturen von über  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht werden, bei denen das Zinn-Blei-Lot schmilzt. Danach wird die Temperatur durch die Strahler gezielt nach unten gefahren und das Lot erstarrt bei einer Temperatur von  $183\text{ }^{\circ}\text{C}$  wieder. Nach einer vordefinierten Zeit wird der Infrarotstrahler komplett ausgeschaltet und die Solarzelle verlässt den Ofen. Anschließend fährt die nächste Solarzelle hinein. Dies geschieht so lange bis alle Solarzellen miteinander seriell zu einem String verschaltet sind. Die folgenden Bilder zeigen das Innere des Ofens mit den Niederhaltern und den ausklingenden Lötprozess.

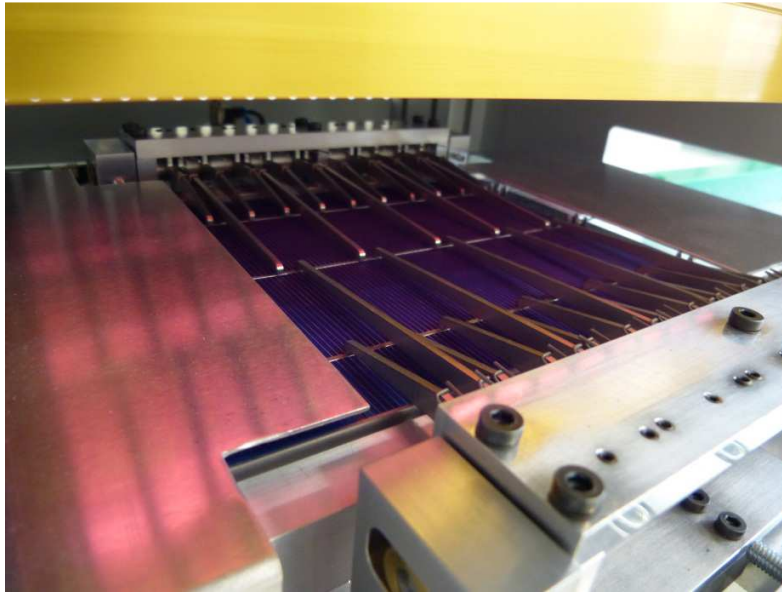


Abbildung 23: Solarzelle durch Niederhalter fixiert im Ofen

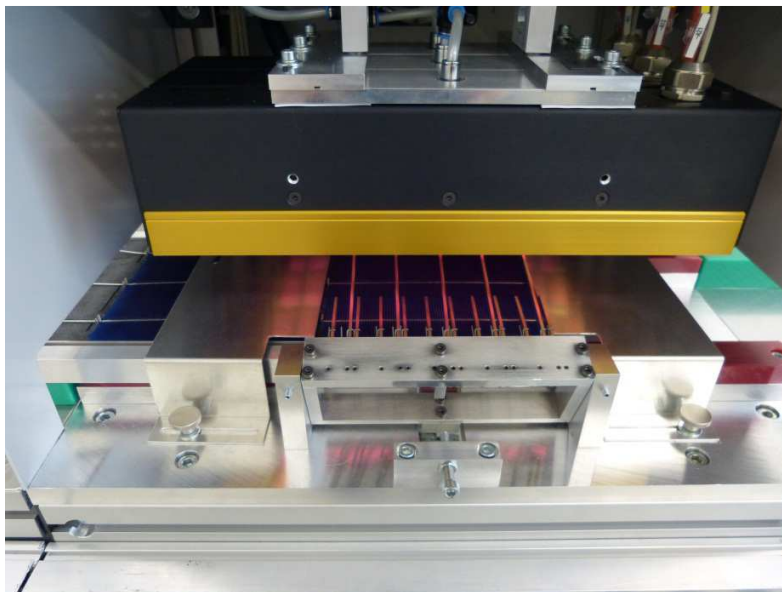


Abbildung 24: Infrarotofen beim Tabber-Stringer Prozess

## 7 Erstellung eines FEM- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Solarzelle mit dem FEM-Analyseprogramm ANSYS zu modellieren und in einer transienten Berechnung des Lötprozesses die daraus folgenden inneren Spannungen abzuleiten. Dazu ist es zunächst notwendig die Geometrie anhand einer technischen Zeichnung in das Programm zu übertragen.

### 7.1 Modellierung der Solarzelle

Modelliert wurde nur ein Viertel der Solarzelle, um bei der anschließenden Berechnung Zeit zu sparen. Die Symmetrie kann ausgenutzt werden, wenn die Geometrie und die Belastungen eines Bauteils symmetrisch sind. Zunächst wurden dazu die Grundflächen der einzelnen Komponenten in einer Ebene modelliert, was in der Abbildung 25 zu sehen ist.

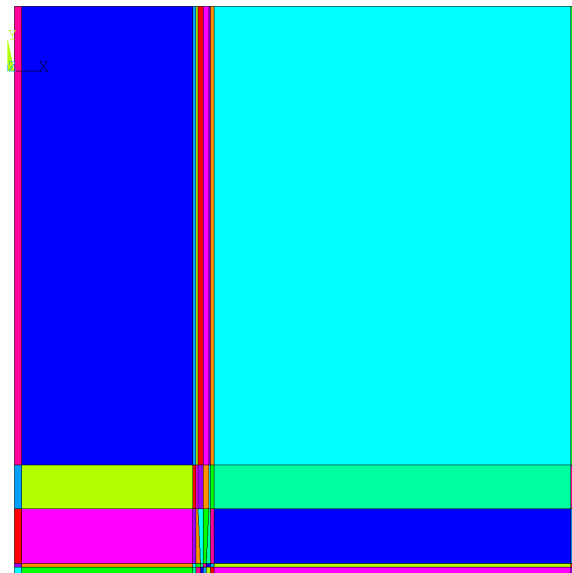


Abbildung 25: Aufteilung der Grundflächen des FEM-Modells der Solarzelle

Durch das anschließende gezielte Vernetzen und das schrittweise extrudieren entsteht das Volumenmodell, welches die Grundlage für diese Arbeit bildet (Abbildung 26).

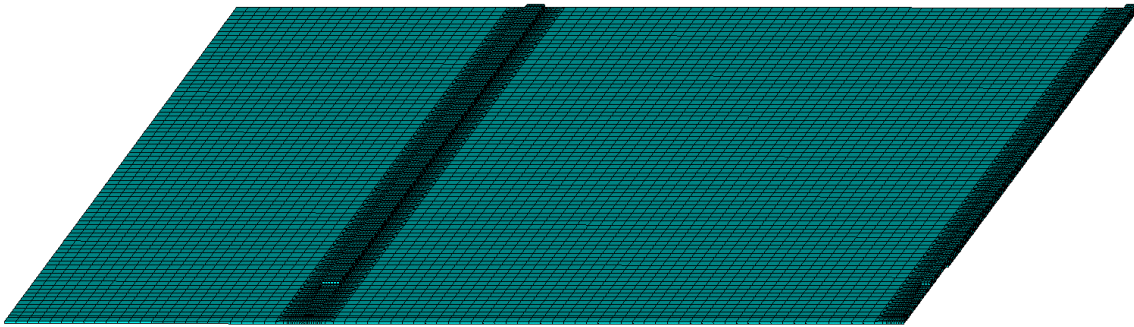


Abbildung 26: Vernetztes und extrudiertes Modell der Solarzelle

Wie die programminterne Modellierung abläuft, kann im Praktikumsbericht [57] nachverfolgt werden, wobei zu erwähnen ist, dass Anpassungen der Geometrie vorgenommen wurden.

## 7.2 Werkstoffkennwerte für die FEM-Analyse

In ANSYS classic ist es notwendig die Werkstoffdaten für die Berechnungen selbständig zu definieren. Je nach Analysetyp werden dafür unterschiedliche Eigenschaften der Werkstoffe benötigt.

Da es sich bei diesem transienten Berechnungsproblem um ein strukturmechanisches, aber auch thermisches Problem handelt, müssen alle Werte dafür bekannt sein.

Für die strukturmechanische Berechnung sind die Werte des Elastizitätsmoduls, des Schubmoduls und der Querkontraktionszahl notwendig.

Hinzu kommen die Werte für die thermische Analyse, die sich aus der Dichte des Materials, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Wärmekapazität und der spezifischen Wärme zusammensetzen.

### Einheitensystem

Prinzipiell ist das Einheitensystem, welches den Berechnungen in ANSYS zu Grunde liegt, frei wählbar. Für den Bereich des Maschinenbaus hat sich jedoch das folgende, von den SI-Einheiten abweichende, System durchgesetzt. Grundlage für die Definition des Einheitensystems sind die bei der Konstruktion üblichen Werte für die Abmessungen von Bauteilen in *mm* und der Kraft in *N*.



Mit den Beziehungen für die Kraft und der Energie

$$1 (N) = \frac{1 (kg) * 1 (m)}{1 (s^2)}$$

$$1 (J) = 1 (N) * 1 (m)$$

$$1 (N) = \frac{1 (kg) * 1 (1e3 mm)}{1 (s^2)} = \frac{1 (1e3 kg) * 1 (mm)}{1 (s^2)}$$

→ Masse:  $m [1e3 kg] = [t]$

$$1 (J) = 1 (N) * 1 (1e3 mm)$$

$$1 (N) = \frac{1 (J)}{1 (1e3 mm)} = \frac{1 (1e - 3 J)}{1 (mm)}$$

→ Arbeit  $W[1e - 3 J]$

ergibt sich das verwendete Einheitensystem.

Dieses Einheitensystem definiert die anderen physikalischen Größen die für die Stoffdaten nötig sind:

Dichte:  $\rho \left[ \frac{t}{mm^3} \right]$

Elastizitätsmodul:  $E \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

Schubmodul:  $G \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$

Querkontraktionszahl / Poissonzahl:  $\mu_0 [-]$

Thermischer Ausdehnungskoeffizient:  $\alpha \left[ \frac{MJ}{mm*s*K} = \frac{MW}{mm*K} \triangleq \frac{W}{m*K} \right]$

Erstellung eines FEM- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium

Wärmeleitfähigkeit:  $k \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$

Spezifische Wärme:  $c \left[ \frac{1e-3 J}{t \cdot K} \right]$

Tabelle 1: Stoffdaten der Solarzelle

	Silizium	Silberpaste	Lot	Kupfer	Aluminiumpaste
Dichte $\rho$ [t/mm <sup>3</sup> ]	2,33E-09	1,05E-08	8,79E-09	8,96E-09	2,70E-09
E-Modul E [N/mm <sup>2</sup> ]	130247,4	7262 <sup>1)</sup> bis 5250	32000	91500 <sup>1)</sup> bis 79200	6238 <sup>1)</sup> bis 3837
Schubmodul G [N/mm <sup>2</sup> ]	79600	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>
Querkontraktionszahl $\mu_0$ [-]	0,27818	0,37	0,359114 <sup>1)</sup> bis 1,35114e-10	0,343	0,347
Wärmeausdehnungs- koeffizient $\alpha$ [W/(m*K)]	2,60E-06	1,04E-05	25,193E-06 <sup>1)</sup> bis 20,570E-09	15,95e-6 <sup>1)</sup> bis 18,21e-6	1,59E-05
Wärmeleitfähigkeit k [W/(m*K)]	150	429	50	380	236
Spezifische Wärmekapazität c [(1e-3 J)/(t*K)]	7,03E+08	2,35E+08	1,93E+08	3,85E+08	8,96E+08

\* 1) Temperaturabhängig

\* 2) Bei Berechnung aus E-Modul abgeleitet

## 7.3 Werkstoffe für den Lötöfen

Nachfolgend sind die beiden Werkstoffe aufgelistet, die nicht Teil der Solarzelle sind, jedoch beim Lötprozess in Form von Niederhalter und Auflager zum Einsatz kommen. Beachtet werden diese, um den Wärmetransport bei der Lötaufgabe darstellen zu können und somit die Genauigkeit des Modells zu erhöhen.

### 7.3.1 Stahl

Der Werkstoff aus dem die Niederhalter gefertigt sind, die beim Löten die Ribbon mit einer geringen Kraft halten, ist Stahl. Für das FEM Modell interessieren in erster Linie die thermischen Eigenschaften, damit der Wärme- und Temperaturtransport ordnungsgemäß erfolgen kann.

### **7.3.2 Kunststoff**

Für den Kunststoff, der das Auflager beim Lötprozess bzw. das Förderband darstellt, wurde PVC angenommen. Auch hier sind nur die thermischen Eigenschaften für die Berechnung des Wärmeprofils notwendig.

## **7.4 Auswahl der Elementtypen**

Bei der Auswahl der Elementtypen wurde darauf geachtet, dass Elemente verwendet werden, die eine quadratische Ansatzfunktion für die Berechnung der Verschiebung besitzen. Quadratische Ansatzfunktionen bieten gegenüber linearen Ansätzen folgende Vorteile:

- Biegung wird besser dargestellt
- Rundungen können besser modelliert werden
- Konvergenz der Berechnung wird erleichtert

Nachteile:

- höherer Berechnungsaufwand

### **7.4.1 Volumenelement**

Beim verwendeten Volumenelement handelt es sich um ein Element mit Quaderform. Es besitzt 20 Knoten mit jeweils drei Freiheitsgraden für die Verschiebung. Acht der Knoten befinden sich dabei an den Ecken des Quaders und die verbleibenden zwölf an den Kanten in der Mitte zwischen zwei Eckknoten.

Da die Analyse in einen thermischen und einen mechanischen Teil gespaltet ist, müssen zwei verschiedene Elemente eingesetzt werden.

Das thermische Volumenelement (SOLID90) ermöglicht es physikalische Eigenschaften wie Wärmefluss, Konvektion, Strahlung oder ähnliches zu simulieren. Durch Konvektion wird bei der späteren Berechnung ein Temperaturprofil berechnet. Danach werden die Ergebnisse auf das mechanische Modell übertragen.

Das mechanische Volumenelement (SOLID186) (Abbildung 27) unterstützt plastische Verformung, Hyperelastizität, zeit- und temperaturabhängiges Kriechen, Verfestigung, große Verformungen und kann auch bei großen mechanischen Spannungen verwendet

werden. Den Knoten des Elements können nur Temperaturen aufgegeben werden, jedoch kann es keine Temperaturen durch physikalische Effekte berechnen. [58]

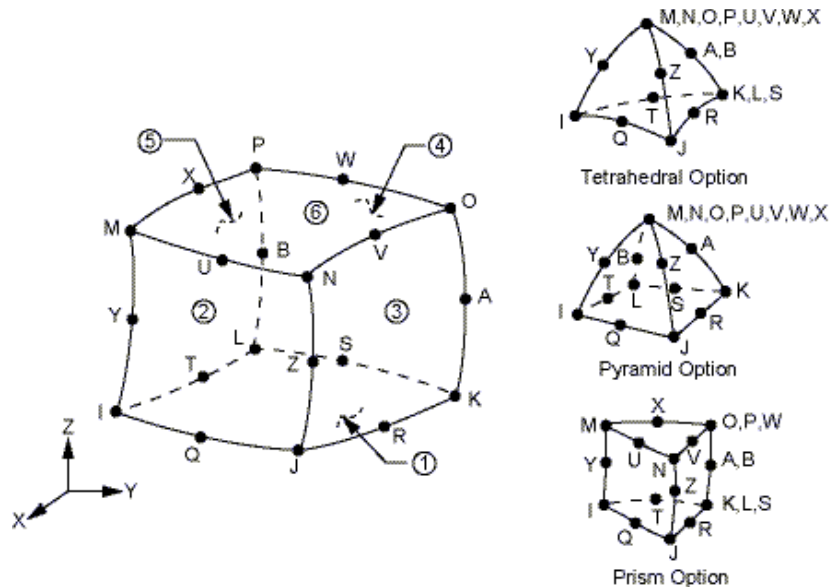


Abbildung 27: 20-Knoten Strukturelement [58]

#### 7.4.2 Kontakt- und Zielelement

Die Kontakt- und Zielelemente sind ebenfalls Elemente mit einem quadratischen Ansatz für die Berechnung der Verschiebung. Es handelt sich bei ihnen um Flächenelemente mit acht Knoten. Bei der Erstellung der Kontaktflächen kann eine Fläche des Volumenelements ausgewählt werden und durch die acht Knoten der Fläche des Volumenelements ein Kontakt- oder Zielelement definiert werden. Kontakt- und Zielelemente treten stets paarweise auf, wenn eine Wechselwirkung zwischen ihnen stattfinden soll. Dazu muss ihre Zusammengehörigkeit definiert werden. Durch die Realkonstanten werden ihre physikalischen Wechselwirkungen aufeinander definiert.

#### 7.5 Einbringen der Kontaktpaare

Um den Lötprozess möglichst realitätsnah darzustellen müssen Kontaktpaare definiert werden. Kontaktpaare ermöglichen es Wechselwirkungen zwischen mehreren Bauteilen

---

abzubilden und zu definieren. Nur so wird es möglich den Lötprozess aussagekräftig nachzustellen.

Die Solarzelle ist anders als im Praktikumsbericht [57] nicht durchgehend aus der Grundfläche extrudiert worden, so dass es sich um ein einziges zusammengehöriges Bauteil handelt. Das Lot wurde zusammen mit dem Ribbon aus einer selbstständigen Fläche extrudiert. Somit besteht das Modell aus einem Bauteil welches aus dem Wafer, der mit den Busbars und der Aluminiumrückseite fest verbunden ist und einzelnen Baugruppen die aus dem Lot und dem Ribbon gebildet werden (Abbildung 28). Die Konsistenz des Modells wurde also aufgelöst und muss durch Kontaktstellen an den sich berührenden Flächen von Busbar und Lot neu definiert werden.

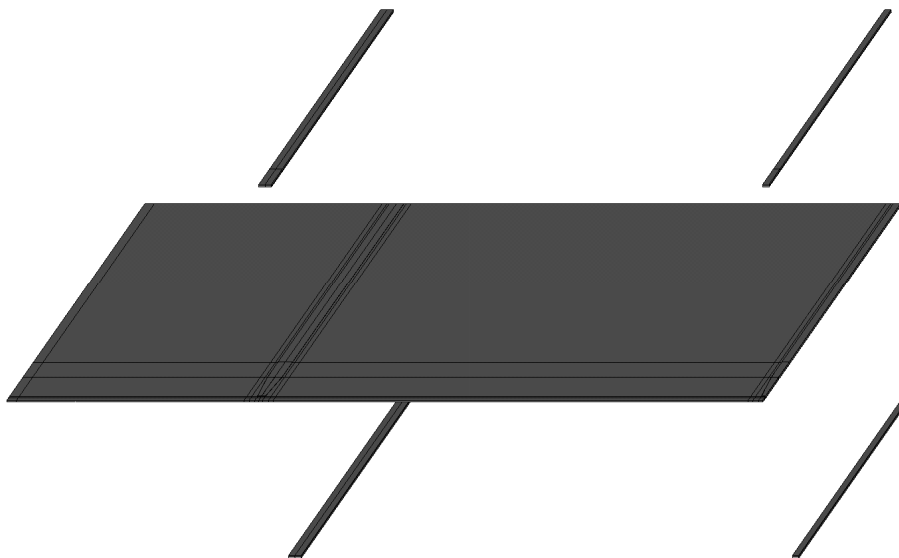


Abbildung 28: Solarzellenverbinder mit Abstand zur Solarzelle

Durch Änderung der Einstellungen der Kontaktelemente zwischen zwei Lastschritten wird es möglich bei der späteren Berechnung des Modells zu bewirken, dass sich die Kontaktflächen bei der Erwärmung der Solarzelle anders verhalten als bei der Abkühlung. Bei der gleichmäßigen Erwärmung der Solarzelle auf die Schmelztemperatur des Lotes sind die Kontaktpaare so eingestellt, dass die Flächen aufeinander reibungsfrei rutschen. Lot und Ribbon können sich dadurch unabhängig vom Rest der Solarzelle ausdehnen, was auf die Realität bezogen das Schmelzen des Lotes darstellt.

Beispielhaft wird im Folgenden die Definition eines Kontaktpaares aufgezeigt. Es ist erkennbar, dass sich die Definition der Kontaktpaare in drei wesentliche Abschnitte unterteilt:

- Definition der Targetfläche
- Definition der Kontaktfläche
- Festlegung der Realkonstanten, die das Verhalten des Kontaktpaares festlegen

```
ASEL,s,AREA,,KF_BB_U1,
nsla,r,1
type,4
mat,2
real,2
esurf,,TOP

allsel

!
ASEL,s,AREA,,KF_L_U1,
nsla,r,1
type,3
mat,3
real,2

R,2,,,FKN,,ICONT,PINBALL
RMORE,,,Reibung,,FKOP,FKT
RMORE,,KKWUSilberLot

esurf,,BOTTOM

allsel
```

Abbildung 29: Quelltext für die Definition eines Kontaktpaares

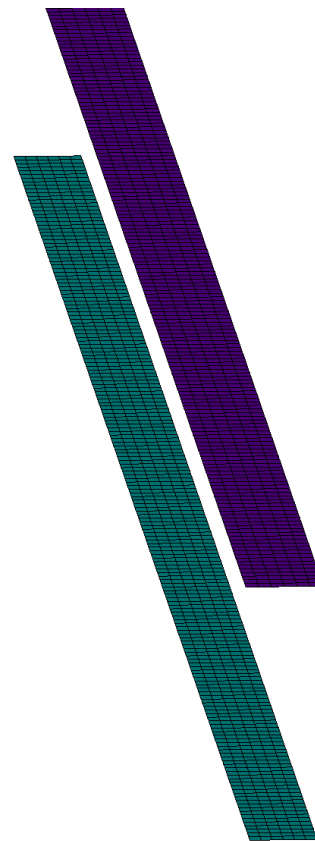


Abbildung 30: Kontaktpaar des linken oberen Busbars mit Abstand zu Visualisierung

## Freiheitsgrad koppeln

Da die Kontakte bei der Erwärmung noch geöffnet sind, würden sich die Ribbons und das Lot nicht nur auf ihrer Längsachse verschieben, sondern auch quer zu den Busbars. Um die Querverschiebung zu verhindern müssen mehrere Knoten durch den CP-Befehl

verbunden werden. Der CP-Befehl macht es möglich, einzelne Knoten in ihren Verschiebungen zu koppeln. In dem Falle erfolgt die Koppelung in der x-Richtung des Koordinatensystems, also quer zu den Busbars. Dazu werden über die Selektierbefehle zuerst Linien ausgewählt. danach die Auswahl auf einzelne Knotenpaare verfeinert und diese dann gekoppelt.

Nach dem Erreichen der Schmelztemperatur werden die Einstellungen der Kontakte so geändert, dass die rutschenden Kontakte zwischen Lot und Busbar zu einer festen Verbindung werden. Dies realisiert das Erstarren des Lotes und der Abkühlvorgang kann beginnen. Verändert werden die Einstellungen der Kontaktpaare durch den Befehl KEYMOD. Die gekoppelten Knoten werden danach wieder gelöscht, da sie nicht weiter benötigt werden.

## 7.6 Modellieren der Niederhalter

Der abgebildete Lötprozess der Solarzelle findet im sogenannten Tabber-Stringer statt. Dabei werden die Ribbons auf die Busbars unter Wärmestrahlung durch Infrarot-Lampen aufgelötet und so seriell mit weiteren Solarzellen verschaltet. Beim eigentlichen Lötprozess hält die Solarzelle mit den aufgelegten Solarzellenverbindern unter den Infrarotlampen an und die Niederhalter fahren nach unten. Sie dienen zur Lagefixierung der Ribbons. Ihre Modellierung ist deswegen wichtig, weil sie als thermische Masse fungieren und so den Abkühlprozess der Solarzelle maßgeblich beeinflussen könnten.

Die Niederhalter wurden vor Ort manuell abgemessen und in das Modell übertragen. Ihre komplexe Geometrie wurde mit den Rundungen modelliert und durch einen Trick konnte ein sogenanntes „Mapped Mesh“ erzeugt werden. Dazu mussten einige Linien kombiniert werden und ihre Unterteilung eingestellt werden. Ein Mapped Mesh kann erzeugt werden, wenn eine Fläche durch vier Linien definiert ist und zwei sich gegenüberliegende Linien dieselbe Teilung besitzen.

Zu Vergleichszwecken zeigen die Abbildung 31 bis Abbildung 34 die Unterschiede die sich bei einer freien Vernetzung und einem Mapped Mesh ergeben. Für die freie Vernetzung wurde nur die grundlegende Geometrie definiert. Damit das Mapped Mesh erzeugt wird, mussten Linien zusammengefügt und unterteilt, sowie die Unterteilung der Flächen neu strukturiert werden.

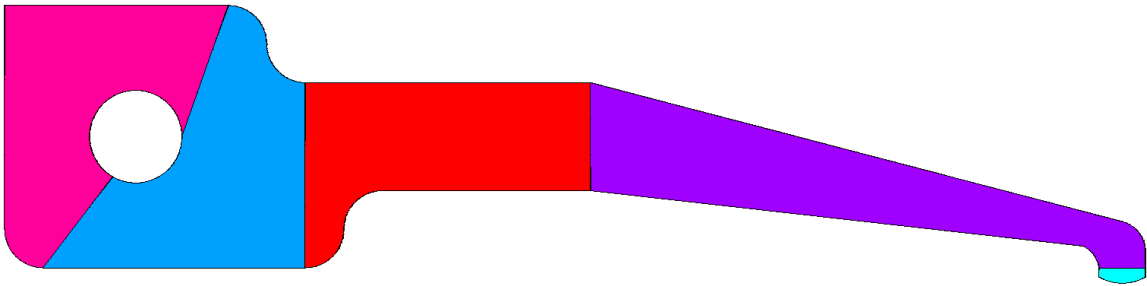


Abbildung 31: erste Flächenunterteilung der Niederhalter

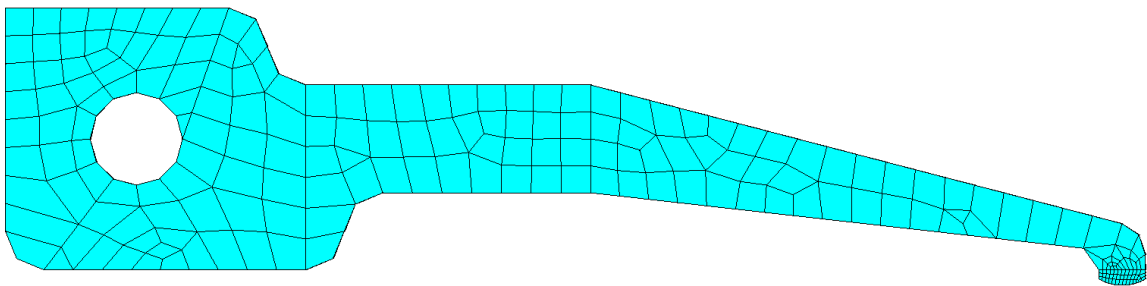


Abbildung 32: Grobes ungeordnetes Netz der Niederhalter

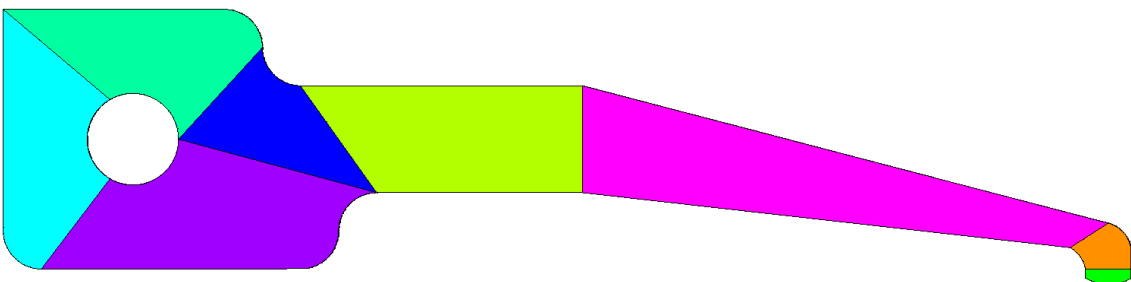


Abbildung 33: Neue Strukturierung der Flächen des Niederhalters

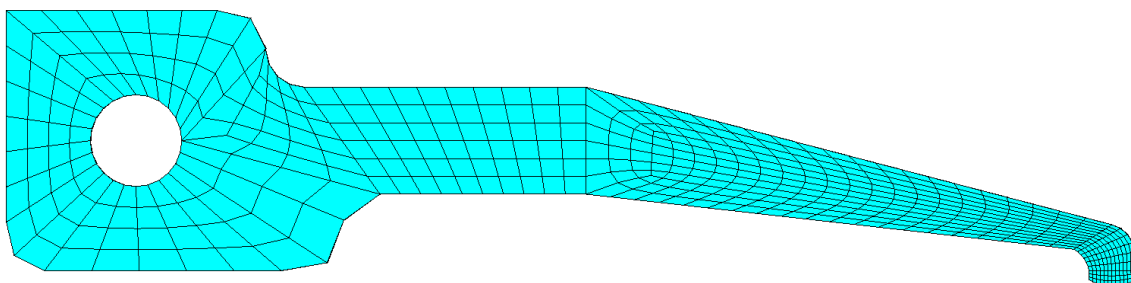


Abbildung 34: Endgültiges Netz der Niederhalter



Das Mapped Mesh ist deswegen von Vorteil, weil es die Rechenzeit und den Fehler gering hält.

#### **Kontakte:**

An der berührenden Fläche der Niederhalter wurde ein Kontaktpaar mit der Oberseite des Solarzellenverbinders erstellt. Dies macht es möglich bei der thermischen Berechnung die Wechselwirkung zwischen den Niederhaltern und der Solarzelle abzubilden.

### **7.7 Modellieren des Kunststoffauflagers**

Ein weiteres Teil welches in das Modell integriert wurde ist das Kunststoffauflager (Abbildung 35) des Tabber-Stringers. Es dient als Auflager für Verschiebungen in Z-Richtung und ebenso wie die Niederhalter als thermische Masse. Zum Erstellen des Auflagers wurde die Grundfläche des Wafers ein weiteres Mal in der negativen Z-Richtung generiert und die erforderlichen Flächen nacheinander herausextrudiert. Die Vernetzung der Oberfläche ist also identisch mit der der Solarzelle. Das bringt den Vorteil mit sich, dass die einzelnen Knoten der Solarzelle und des Auflagers direkt übereinander liegen.

#### **Kontakte**

Da es sich bei dem Kunststoff um ein Auflager handelt, wurden Kontaktpaare zwischen dem Kunststoffauflager und der Solarzelle gebildet. Diese Kontaktpaare dienen ebenfalls dem Wärmetransport.

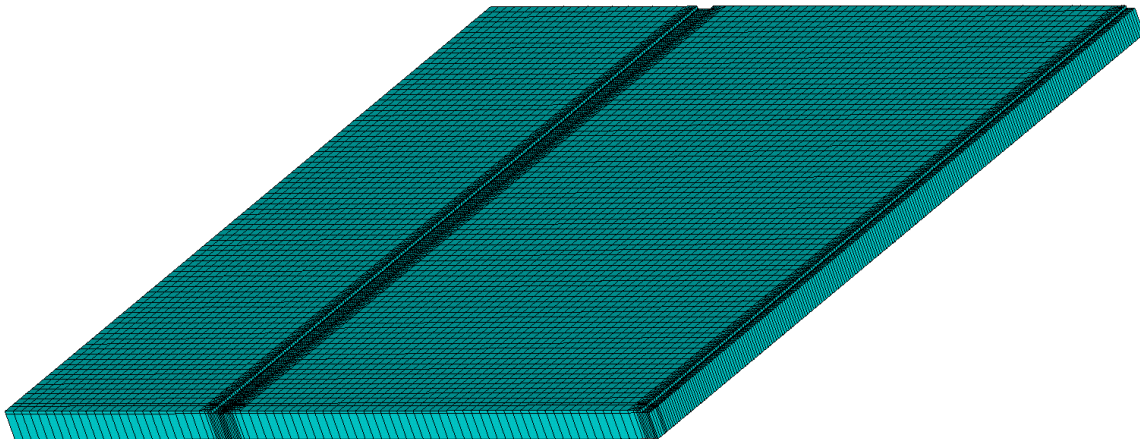


Abbildung 35: Kunststoffauflager

## 7.8 Lösung des FEM-Modells

Die Lösung des Modells erfolgt in mehreren transienten Lösungsschritten. Dabei werden zeitabhängige thermische Lasten aufgegeben, die aus einem gemessenen Temperaturprofil abgeleitet wurden. Es wird vor allem darauf geachtet, dass der Abkühlvorgang möglichst genau abgebildet wird. Das hat es nötig gemacht zwei verschiedene, jedoch aufeinander basierende Modelle für einen kompletten Rechendurchlauf zu verwenden.

Bei dem ersten Modell handelt es sich um das thermische Modell, welches das Temperaturfeld durch Oberflächenkonvektion und Wärmeleitung beim Abkühlvorgang berechnet. Dabei werden weitere Bauteile, die beim Lötprozess vorkommen in das ursprüngliche Modell eingefügt, um ihre Auswirkung auf den Wärmefluss zu berücksichtigen.

Das nach der Berechnung erhaltene transiente Temperaturfeld wird in das einfache Modell der Solarzelle eingelesen. Dabei bleibt die Nummerierung der Knoten gleich, so dass die Knotentemperaturen in die strukturelle Berechnung einfließen können.

### Ablauf Temperaturfeldberechnung

Bei einer früheren Untersuchung des Tabber-Stringers wurde durch Temperatursensoren der Temperaturverlauf an den einzelnen Busbars gemessen. Der daraus entstandene Temperaturverlauf ist der Abbildung 36 zu entnehmen. Aus diesem wurden einzelne Zeitpunkte herausgezogen und die Temperaturen abgelesen die die Grundlage für die Berechnung bilden.

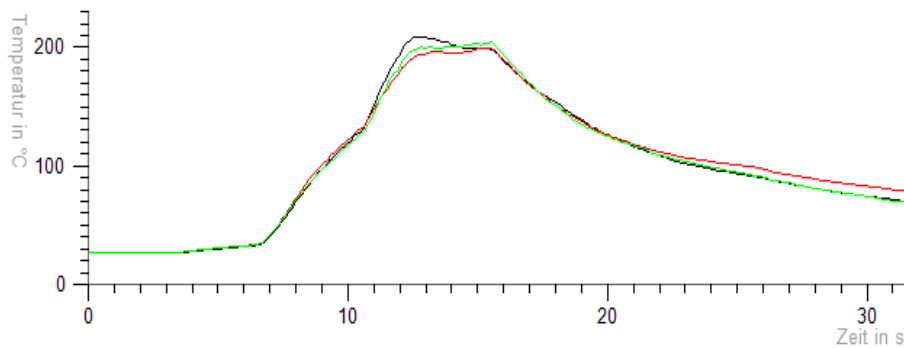


Abbildung 36: Gemessener Temperaturverlauf beim Löten

Weil die Kontaktpaare sich bei der strukturellen Berechnung in einem ersten Rechenschritt erst finden müssen, werden zu den abgelesenen Zeiten noch 100 s addiert. Das verändert das Ergebnis für den Abkühlprozess nicht, weil die absoluten Abkühlzeiten gleich bleiben:

Die Tabelle 2 und die Abbildung 37 zeigen die modellieren Abkühlzeiten.

Tabelle 2: Tabellarischer Temperaturverlauf des Lötprozesses

Temperatur [°C]	interne Zeit [s]	Abkühlzeit [s]
20	0	-
183	116,3	-
150	118,1	1,8
125	120	3,7
100	123,7	7,4
75	130,5	14,2
20	160	43,7
20	300	183,7

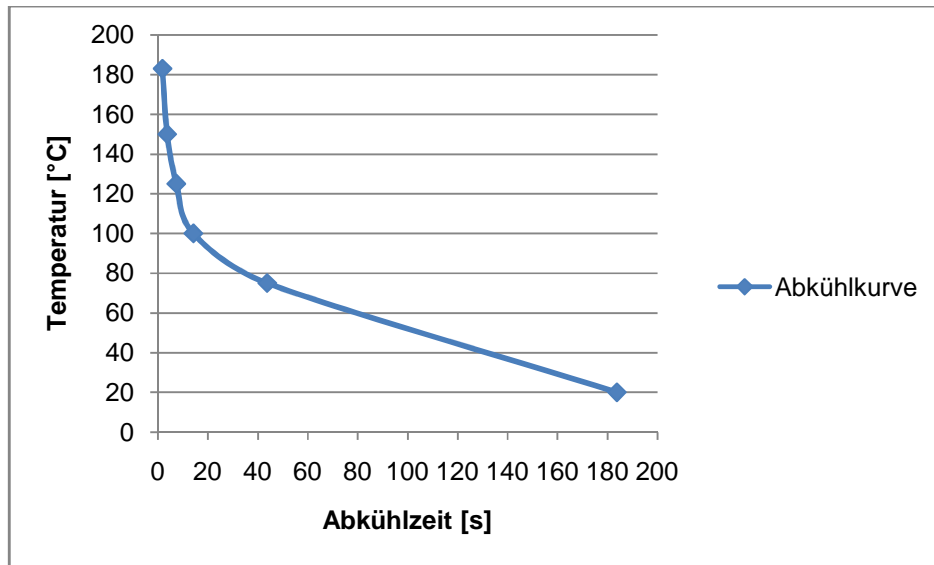


Abbildung 37: Modellierter Abkühlverlauf

Da der gemessene Temperaturverlauf es nur zulässt für die Temperaturwerte von minimal 75 °C gegen Ende des Verlaufs Zeiten zu entnehmen, sind die Zeitwerte für die Temperatur von 20 °C in einem genügend großen Abstand definiert wurden.

Die Temperaturfeldberechnung beginnt bei 183 °C Anfangstemperatur, da das Aufheizen hier noch nicht relevant ist. Darauf folgt die Abkühlung über Konvektion bis zu der internen Zeit von 160 s. Zu diesem Zeitpunkt sind noch Temperaturunterschiede im Modell vorhanden. Bei der internen Zeit von 300 s, was einer Abkühlzeit von über drei Minuten entspricht, werden alle Knotentemperaturen auf 20 °C gesetzt. Das Modell ist zu diesem Zeitpunkt also vollständig abgekühlt.

Thermische Randbedingungen sind an den Halterungen der Niederhalter und an der Unterseite des Kunststoffauflagers angebracht und betragen 20 °C. Durch Wärmeleitung entziehen diese Randbedingungen dem System zusätzlich Wärme, wie die Abbildung 38 zeigt.

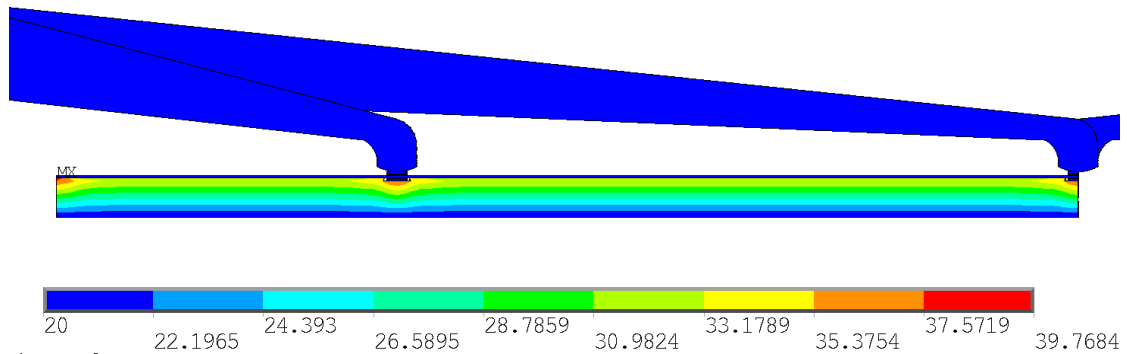


Abbildung 38: Zusammenspiel der einzelnen Bauteile bei der Temperaturfeldberechnung

Die Abbildung 39: Temperaturverteilung bei 150 °C Konvektionstemperatur bis Abbildung 43: Temperaturverteilung bei 20 °C Konvektionstemperatur zeigen die Temperaturverteilung des Wafers, die sich beim Abkühlen durch die Konvektion ergeben. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass sich die Wärme unter den Solarzellenverbindern staut und dass die Niederhalter aus Stahl punktuell zu einer höheren Temperatur des Wafers führen. Am Anfang der Abkühlung ist der Rand des Wafers um mehr als 2 °C kälter als direkt unter den Niederhaltern. Dieser Unterschied wird mit fortschreitender Abkühlung geringer.

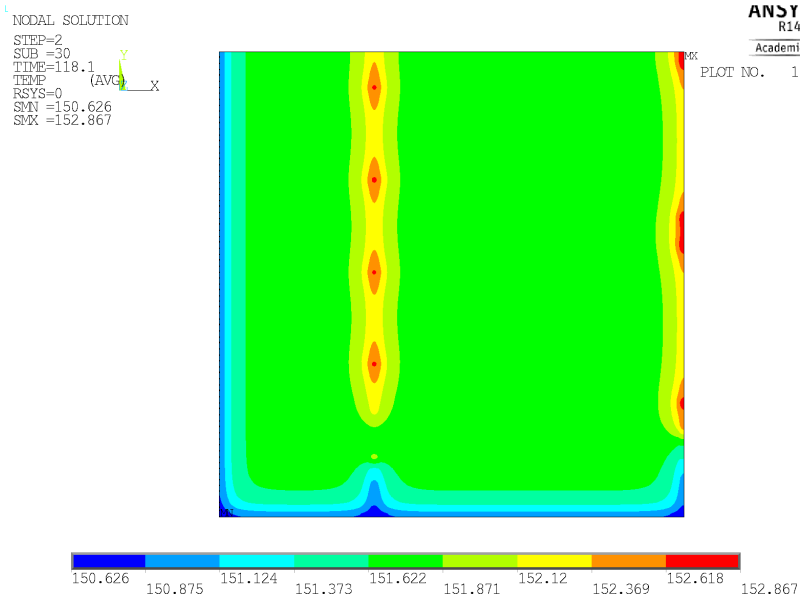


Abbildung 39: Temperaturverteilung bei 150 °C Konvektionstemperatur

Erstellung eines FEM- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium

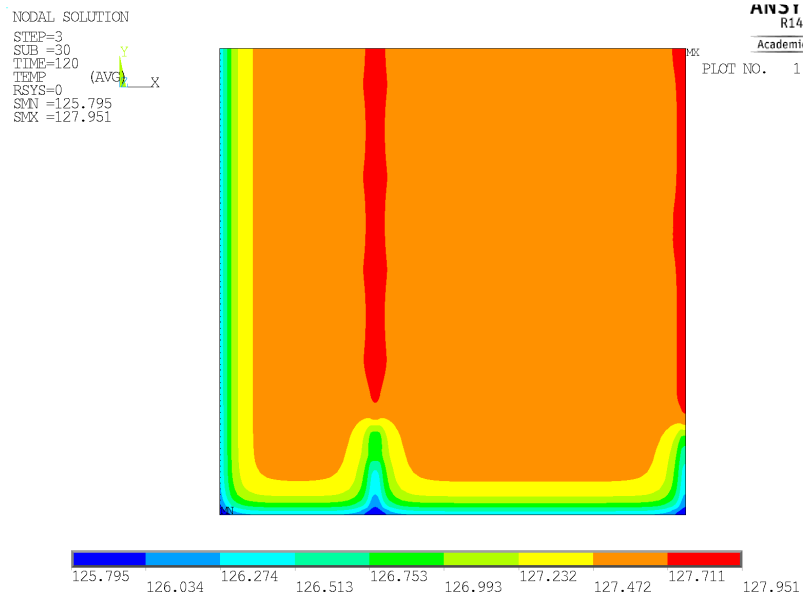


Abbildung 40: Temperaturverteilung bei 125 °C Konvektionstemperatur

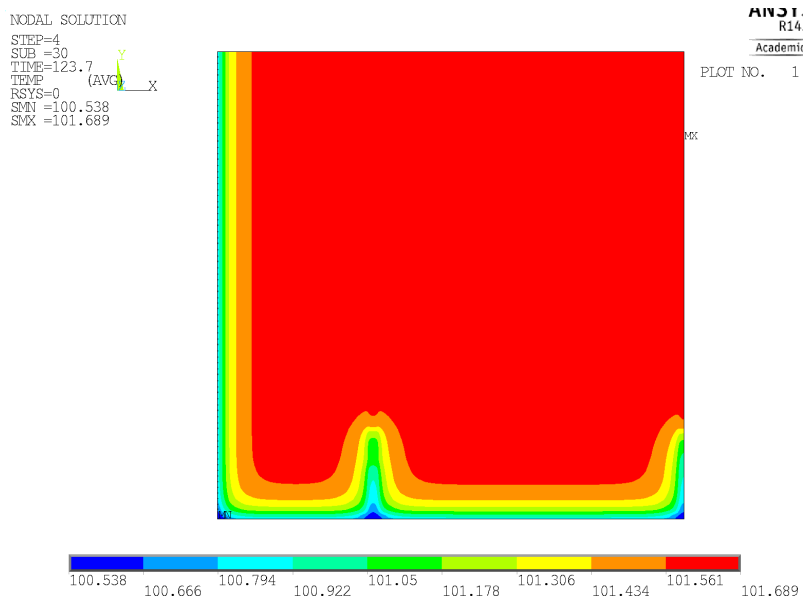


Abbildung 41: Temperaturverteilung bei 100 °C Konvektionstemperatur

Erstellung eines FEM- Modells zur transienten Temperaturfeldberechnung und den daraus resultierenden Spannungen im Silizium

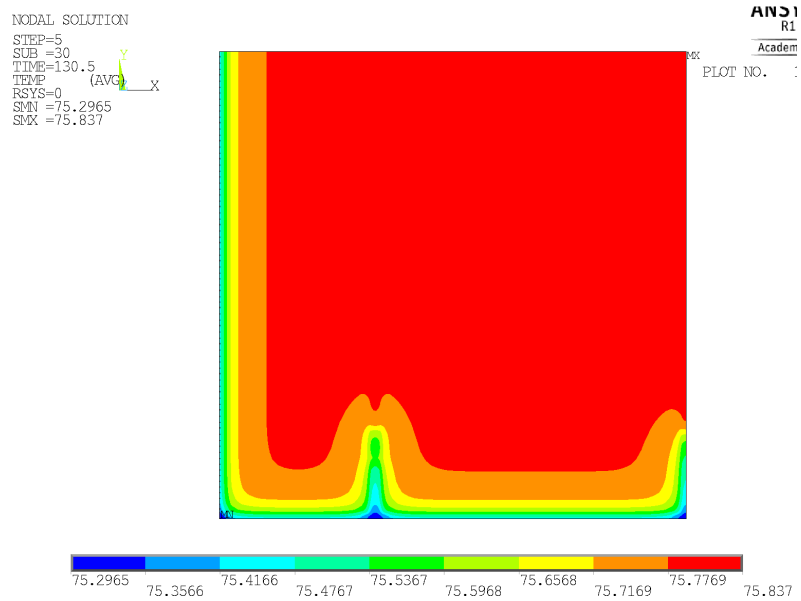


Abbildung 42: Temperaturverteilung bei 75 °C Konvektionstemperatur

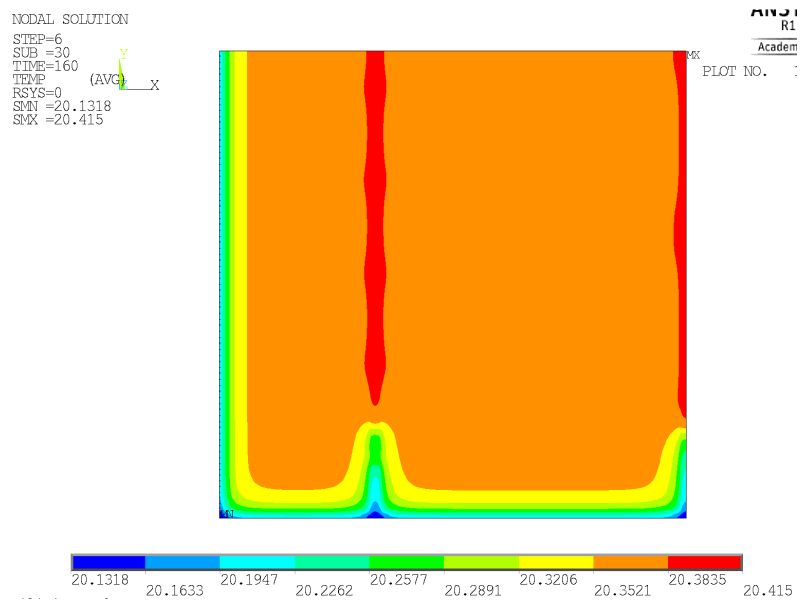


Abbildung 43: Temperaturverteilung bei 20 °C Konvektionstemperatur

Das nachstehende Bild zeigt auszugsweise den Temperaturverlauf des Lotes zum Ende der Abkühlung. Dadurch wird erkennbar, dass die Konvektion auch auf die anderen Bauteile der Solarzelle einen Einfluss hat. Deutlich zu erkennen sind auch auf diesem

Bild die Stellen mit einer leicht erhöhten Temperatur, die sich beim Lötprozess unter den Niederhaltern befinden.

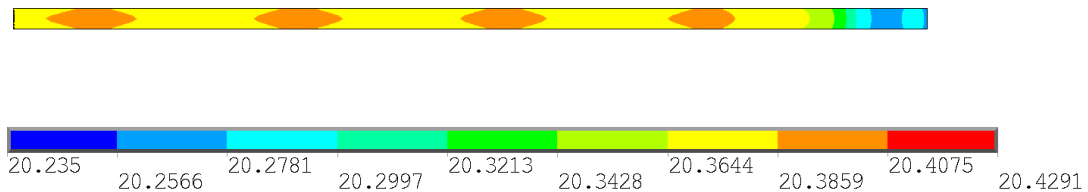


Abbildung 44: Temperaturverteilung des Lotes am Ende der Abkühlung durch Konvektion

### Ablauf Strukturberechnung

ANSYS macht es möglich durch den Wechsel der Elementtypen die Analyseart zu verändern. In diesem speziellen Fall wird das eben genannte SOLID90 durch das SOLID186 ersetzt, welches ebenfalls ein 3D-Element mit 20 Knoten ist. Aus diesem Grund sind die Knotennummern gleich, weil es bei der Modellierung auch gleich behandelt wird.

Die Niederhalter und das Kunststoffauflager werden aus dem Modell herausgelöscht um Rechenzeit zu sparen und die Konvergenz des Modells zu erleichtern. Anschließend werden nach dem ersten Rechenschritt, der zur Findung der Kontaktpaare dient durch den LDREAD-Befehl die Knotentemperaturen aus dem thermischen in das strukturelle Modell übertragen und die Lösung gestartet:

```
LDREAD,Temp,1,LSTEP,,,Solarzelle90,rth  
solve  
save
```

In dem Strukturmodell führen anschließend die aufgegebenen Temperaturen zu einer thermischen Ausdehnung der Elemente und damit zu Spannungen, wo die Elemente bei der Ausdehnung gehindert werden. Zunächst sind die Einstellungen der Kontaktpaare zwischen dem Lot und den Busbars zu gewählt, dass eine unabhängige Ausdehnung der Solarzellenverbinder (Kupfer und Lot) und der restlichen Solarzelle zugelassen ist. Nach dem zweiten Rechenschritt, der das Modell komplett auf 183 °C erhitzt und die Kontaktpaare werden geschlossen. In jedem Lastschritt werden die entsprechenden Knotentemperaturen zur Abkühlung aufgegeben, bis die Temperatur im Modell überall 20 °C beträgt.



## 8 Durchführung von Parameterstudien

Durch das modellierte FEM-Modell wird es möglich Parameterstudien durchzuführen um die Auswirkung einzelner Veränderungen der Komponenten oder der Lastfälle zu erkennen und daraus Schlüsse für die zukünftige Fertigung zu ziehen. Da das Modell nur den Lötprozess untersucht, werden auch nur die Parameter geändert, die zu diesem Zeitpunkt noch beeinflusst werden können. Diese veränderbaren Parameter sind zum einen die Abkühlkurve, zum anderen die Dicke des Kupferribbons und des Lotes, die sich durch die Wahl des Solarzellenverbinders ergeben. Darüber hinaus wird noch auf den Versatz der Solarzellenverbinder zu den Busbars eingegangen, der beim Fügen entstehen kann.

### 8.1 Ablauf der Bewertung der Parameterstudien

Die Ergebnisse, die durch die Rechnungen entstanden sind, müssen sinnvoll untersucht und miteinander verglichen werden. Jede einzelne Berechnung ergibt Knotenspannungen für die gesamte Solarzelle, wie die Abbildung 45 zeigt:

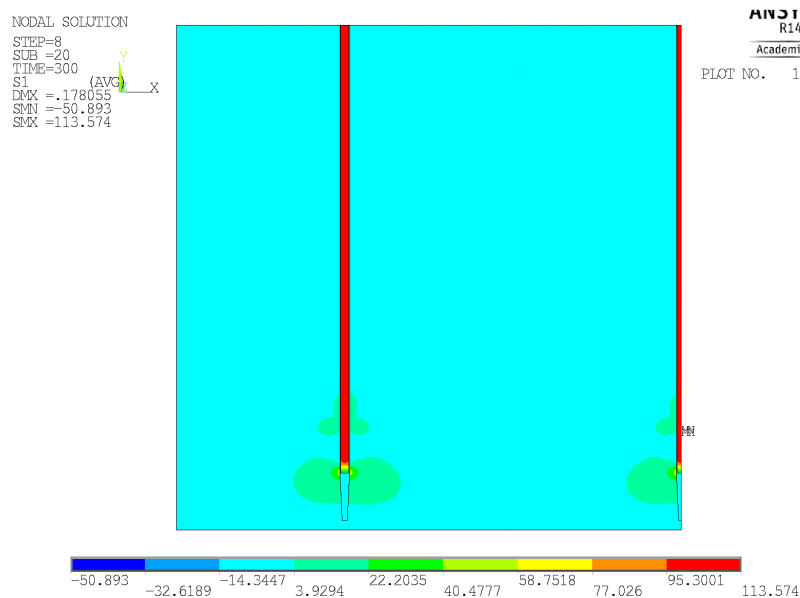


Abbildung 45: Konturplot der ersten Hauptspannung der Solarzelle

Anschließend wird nur der Siliziumwafer selektiert. Zu erkennen sind in der Abbildung 46 und Abbildung 48 die Stellen an denen die Solarzellenverbinder aufgelötet sind.

Jeweils am Ende des oberen und unteren Solarzellenverbinders entstehen deutliche Spannungsspitzen, welche in den Vergrößerungen der Abbildung 47 und Abbildung 49 deutlich zu erkennen sind. Diese lokalen Spannungsspitzen sind die Hauptauslöser für ein Versagen der Solarzelle und werden deshalb genau untersucht.

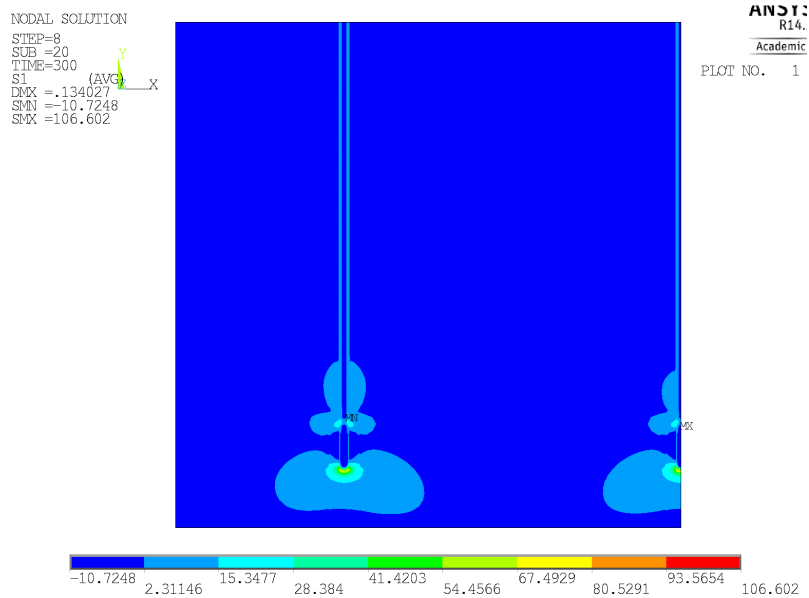


Abbildung 46: Konturplot der ersten Hauptspannung der Oberseite des Wafers

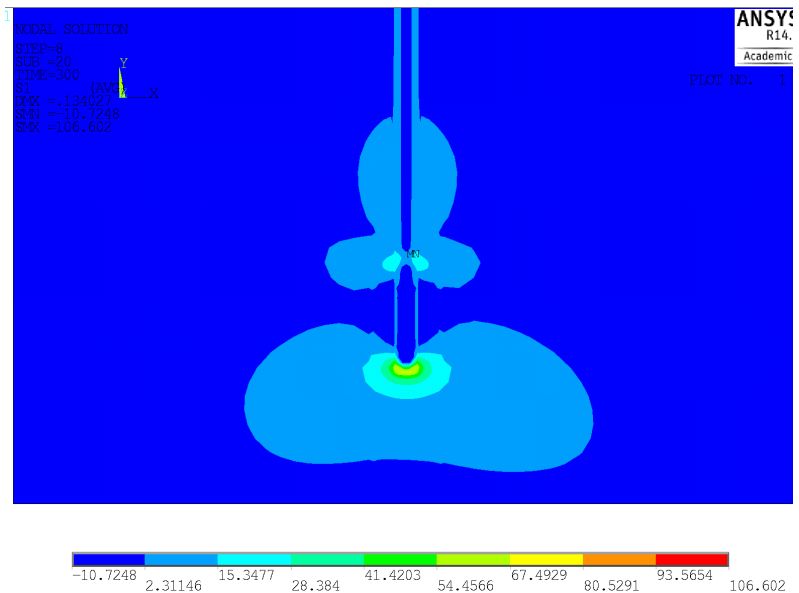


Abbildung 47: Konturplot der ersten Hauptspannung der Oberseite des Wafers in der Nahansicht

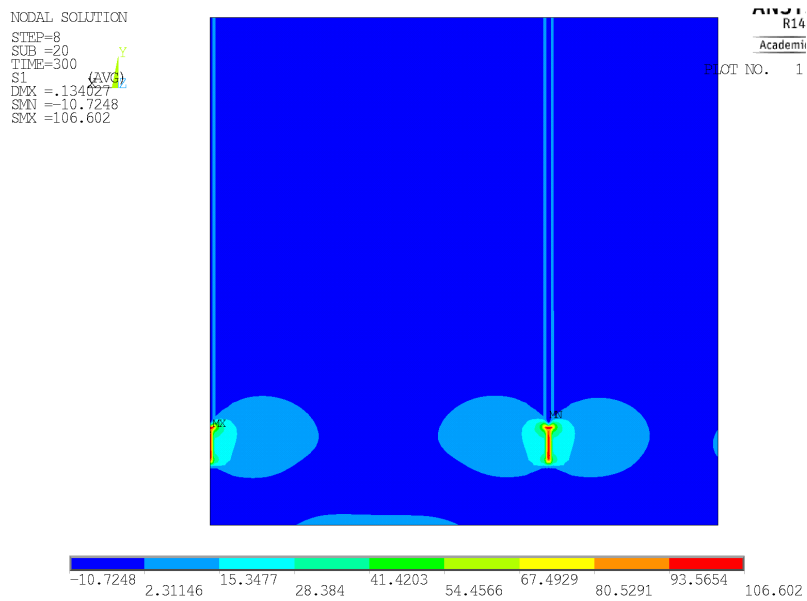


Abbildung 48: Konturplot der ersten Hauptspannung der Unterseite des Wafers

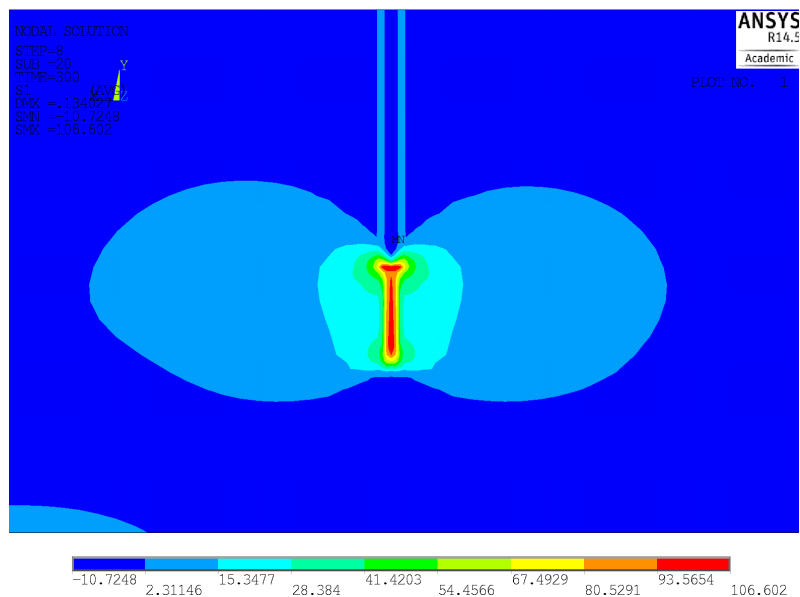


Abbildung 49: Konturplot der ersten Hauptspannung der Unterseite des Wafers in der Nahansicht

Damit die Untersuchung erfolgen kann, werden aus jedem Modell Daten entnommen, die am selben Ort des Wafers der Solarzelle sind. Die Auswertung erfolgt auf der Grundlage von selbst definierten Pfaden, die die lokalen Maximalstellen genau untersuchen.

Aus diesem Grund wird in dem folgenden Konturplot der Abbildung 50 aufgezeigt, wo diese Pfade liegen und wie diese Daten erstellt werden.

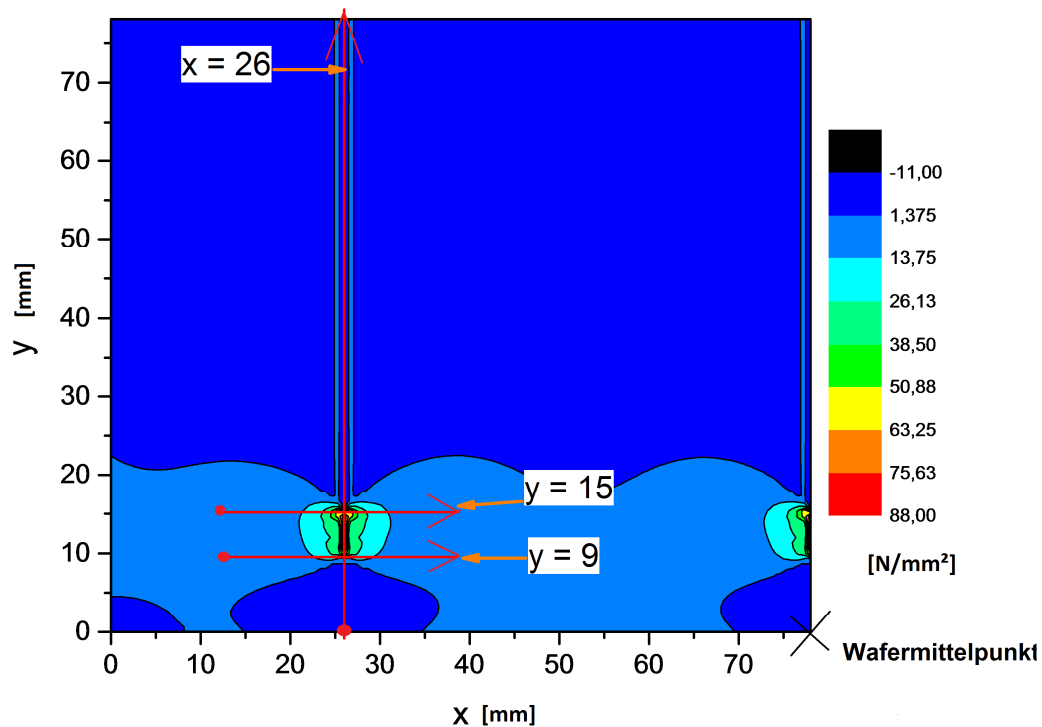


Abbildung 50: Konturplot der ersten Hauptspannung mit den eingezeichneten Pfaden für die Auswertung

Mit Hilfe der eingezeichneten Pfade erfolgt die Auswertung. Ein selbst erstelltes Makro weist dabei den Pfaden ihre Spannungsdaten zu, plottet diese und macht ein Bild davon, welches manuell ausgewertet wird. Dabei wird zwar nicht der gesamte Wafer ausgewertet, jedoch können gute Aussagen über die markanten Stellen des Wafers getroffen werden. Bei der Bezeichnung der Pfade stellt der erste Buchstabe (X oder Y) die Achse dar, die auf Höhe der Zahl [mm] vertikal geschnitten wird. Der letzte Buchstabe dient zur Identifizierung der Ober- (O) oder Unterseite (U).

## 8.2 Beschreibung der Pfade

### 8.2.1 Pfade direkt und längs unter dem Busbar

#### Oberseite des Wafers (X260)

Der erste Pfad verläuft genau längs unter der Mitte des linken Busbars bei 26 mm Abstand zum Rand in x-Richtung. Hierbei wird der direkte Einfluss der Solarzellenverbinder über die Länge der Solarzelle ersichtlich. Die Abbildung 51 zeigt die drei Hauptspannungen für diesen Pfad auf. Gleichzeitig wird erklärt wo die lokalen maximalen Spannungen liegen und aus welchen Spannungskomponenten sie sich hauptsächlich zusammensetzen.

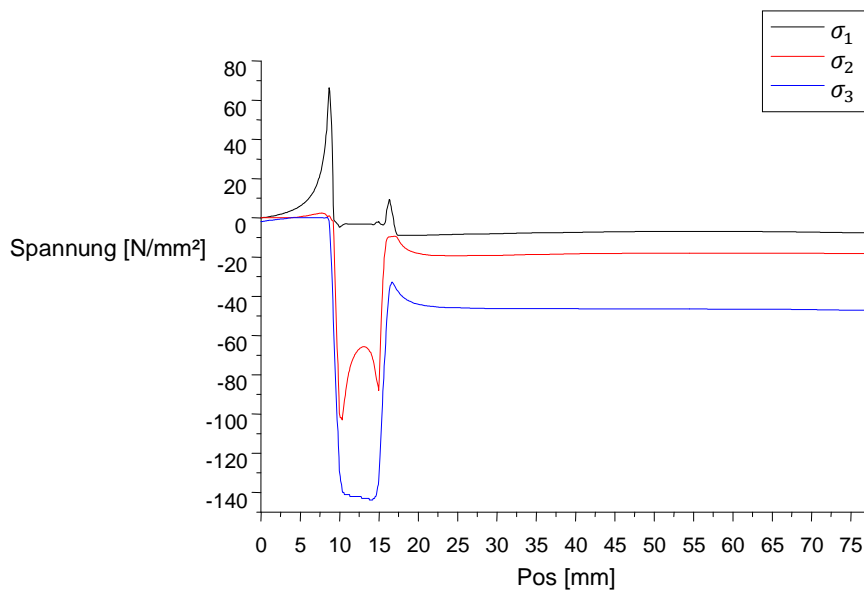


Abbildung 51: Hauptspannungen X260

Zum Vergleich zeigt Abbildung 52 die xyz-Komponenten der Spannungen, die über den Pfad wirken.

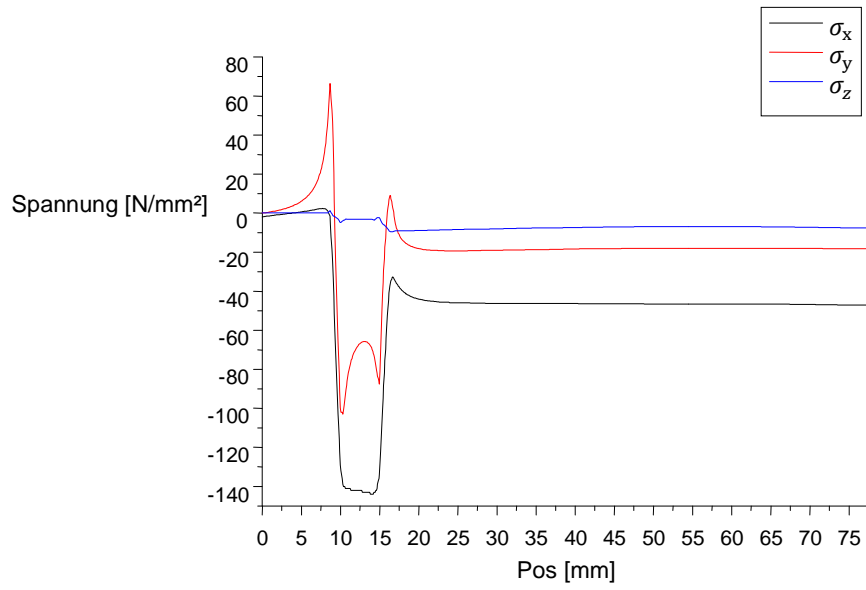


Abbildung 52: Spannungen in den Raumkoordinaten X260

<p><b>Erste Hauptspannung</b></p> <p><b>Beschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximum bei <math>y = 9 \text{ mm}</math></li> <li>• Weiterer Peak bei <math>x = 15 \text{ mm}</math></li> <li>• Im restlichen Teil nur geringe Spannungen</li> </ul>	<p><b>Zusammensetzung der Spannungskomponenten:</b></p> <p>Bereich I: <math>0 \text{ mm} &lt; x &lt; 9 \text{ mm}</math>: Haupteinfluss Spannung in y-Richtung</p> <p>Bereich II: <math>9 \text{ mm} &lt; y &lt; 15 \text{ mm}</math>: Haupteinfluss Spannung in z-Richtung</p> <p>Bereich III: <math>15 \text{ mm} &lt; y &lt; 15,5 \text{ mm}</math>: Haupteinfluss Spannung in y-Richtung</p> <p>Bereich IV: <math>15,5 \text{ mm} &lt; y &lt; 78 \text{ mm}</math> Haupteinfluss Spannung in z-Richtung</p>
<p><b>Zweite Hauptspannung</b></p> <p><b>Beschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptsächlich negative Spannungen</li> <li>• Minimum bei <math>y = 9 \text{ mm}</math></li> <li>• zweiter Peak bei <math>y = 15 \text{ mm}</math></li> </ul>	<p><b>Zusammensetzung der Spannungskomponenten:</b></p> <p>Bereich I: <math>0 \text{ mm} &lt; y &lt; 9 \text{ mm}</math> Haupteinfluss Spannung in x-Richtung</p> <p>Bereich II: <math>9 \text{ mm} &lt; y &lt; 78 \text{ mm}</math> Haupteinfluss Spannung in y-Richtung</p>
<p><b>Dritte Hauptspannung</b></p> <p><b>Beschreibung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptsächlich negative Spannungen</li> <li>• Minimum im Bereich von <math>9 \text{ mm} \leq y \leq 15 \text{ mm}</math></li> </ul>	<p><b>Zusammensetzung der Spannungskomponenten:</b></p> <p>Bereich I: <math>0 \text{ mm} &lt; y &lt; 9 \text{ mm}</math> Haupteinfluss Spannung in z-Richtung</p> <p>Bereich II: <math>9 \text{ mm} &lt; y &lt; 78 \text{ mm}</math> Haupteinfluss Spannung in x-Richtung</p>

Jeder dieser Spannungsplots zeigt die maximalen oder minimalen Hauptspannungen bei der y-Koordinate von  $9 \text{ mm}$  bzw.  $15 \text{ mm}$ . Das ist ein zu erwartendes Phänomen, weil

bei 9 mm auf der Oberseite und bei 15 mm auf der Unterseite die Solarzellenverbinder beginnen bzw. enden. Die Spannungen die durch die Solarzellenverbinder in das System gebracht werden bauen sich in diesem Areal auf. Durch Kerbwirkungen die an der Übergangsstelle von Solarzellenverbinder und Busbar vorhanden sind, wird dies noch verstärkt.

Bei der späteren Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit werden nur die erste und zweite Hauptspannung angewendet, die für ein Versagen einer ebenen Fläche verantwortlich sind. Aus diesem Grund wird bei der weiteren Auswertung die dritte Hauptspannung nicht weiter aufgeführt.

Ausgewertete Daten bei Parameterstudie "Breite Solarzellenverbinder", "Lotdicke" und "Temperaturverlauf":

- Maximale erste Hauptspannung
- Minimale erste Hauptspannung
- Maximale zweite Hauptspannung
- Minimale zweite Hauptspannung

### **Unterseite des Wafers (X26U)**

Der folgende Pfad der Abbildung 53 für die Hauptspannungen und die Spannungen in den Raumkoordinaten stellt das Pendant zum ersten Pfad dar. Er befindet sich auf der Unterseite des Wafers.



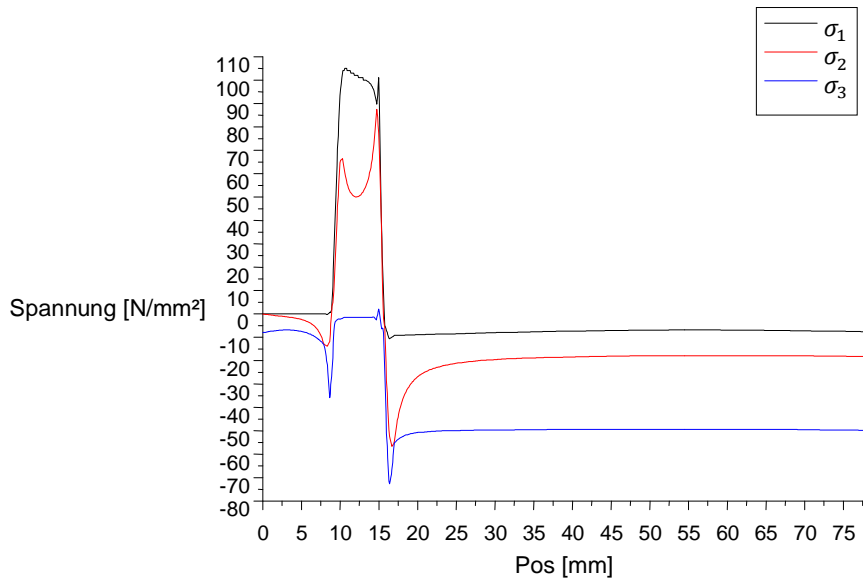


Abbildung 53: Hauptspannungen X26U

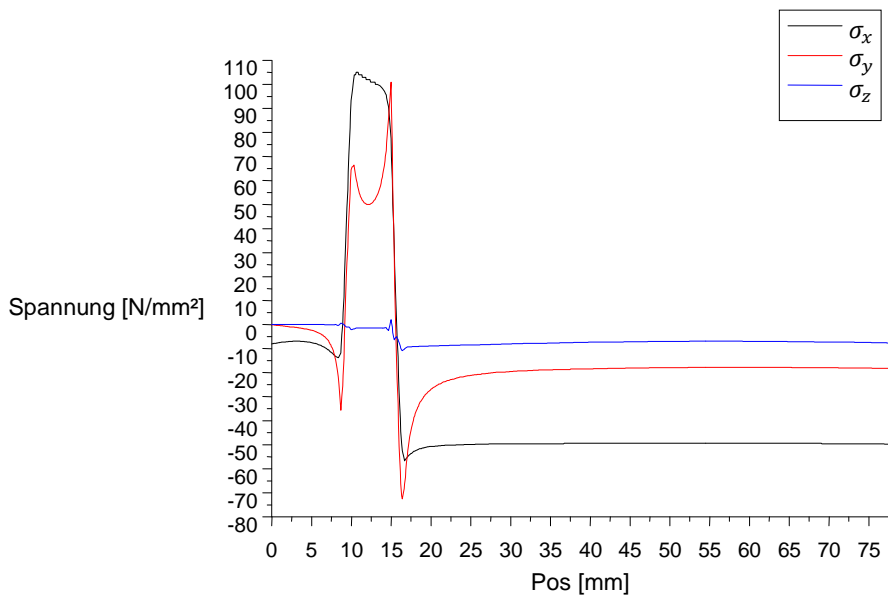


Abbildung 54: Spannungen in den Raumkoordinaten X26U

## Erste Hauptspannung

### Beschreibung:

- Maximum bei  $y = 9 \text{ mm}$
- Weiterer Peak bei  $x = 15 \text{ mm}$
- generell hohe Spannung im Bereich  $9 \text{ mm} \leq y \leq 15 \text{ mm}$
- Im restlichen Teil nur geringe Spannungen
- höchste Zugspannungen im System

## Zweite Hauptspannung

### Beschreibung:

- Maximum bei  $y = 15 \text{ mm}$  --> danach starker Spannungsabfall bis in negative Richtung
- Weiterer Peak bei  $x = 9 \text{ mm}$
- im restlichen Teil des Wafers moderate Spannungen

Ausgewertete Daten bei Parameterstudie "Breite Solarzellenverbinder", "Lotdicke" und "Temperaturverlauf":

- Maximale erste Hauptspannung
- Minimale erste Hauptspannung
- Maximale zweite Hauptspannung
- Minimale zweite Hauptspannung

## Erklärung für die hohen Spannungen im Bereich $9 \text{ mm} < y < 15 \text{ mm}$ :

Auf der Oberseite des Wafers entstehen im Bereich  $9 \text{ mm} < y < 15 \text{ mm}$  hohe Druckspannungen und auf der Unterseite hohe Zugspannungen. Zur Erklärung dieser Spannungen sollen die Abbildung 55 und Abbildung 56 dienen.



Abbildung 55: Verformter Schnitt der Solarzelle

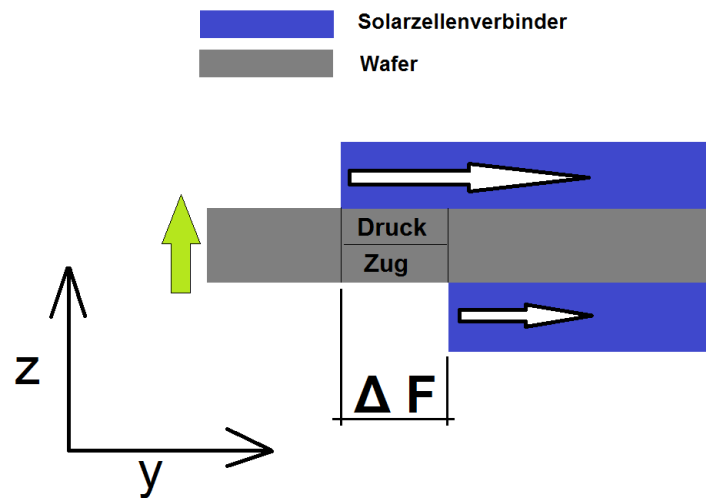


Abbildung 56: Skizze der wirkenden Kräfte

Durch den unterschiedlich großen Wirkungsbereich der Solarzellenverbinder auf Ober- und Unterseite findet eine Verformung des Wafers statt. Bei der Abkühlung des Lötprozesses zieht sich der längere obere Solarzellenverbinder mehr zusammen als der kürzere auf der Unterseite. Dies bewirkt im Bereich  $9 \text{ mm} < y < 15 \text{ mm}$  eine Biegung in die positive z-Richtung des Wafers. An der Unterseite wird dieser dadurch gestreckt und es entsteht eine Zugspannung und die Oberseite durch die Stauchung eine Druckspannung in y-Richtung.

Die noch größeren Spannungen, die in x-Richtung auftreten können nicht so trivial erklärt werden. Der folgende Vektorplot der Abbildung 57 zeigt, dass sich die erste Hauptspannung in dem ausgewählten Bereich von der z- in die x-Richtung dreht.

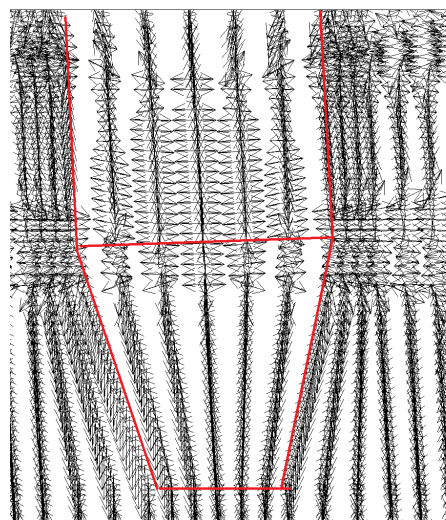


Abbildung 57: Vektorplot der ersten Hauptspannung des Wafers

### **8.2.2 Pfade auf dem Wafer quer zum Busbar**

Die Pfade quer zu den Solarzellenverbindern befinden sich an den Enden der Solarzellenverbinder im Modell mit einem Abstand von  $9\text{ mm}$  bzw.  $15\text{ mm}$  vom Rand in  $y$ -Richtung. Hier treten die höchsten Spannungen im System auf. Die Pfade quer zu den Busbars reichen in  $x$ -Richtung von  $13\text{ mm}$  bis  $39\text{ mm}$  (grafintern:  $0\text{ mm}$  bis  $26\text{ mm}$ ), wobei die Mitte bei  $26\text{ mm}$  (grafintern:  $13\text{ mm}$ ) die Mitte des Solarzellenverbinders in  $x$ -Richtung aufzeigt.

#### **Oberseite bei $y = 9\text{ mm}$ (Y90)**

Die Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen den Spannungsverlauf der Oberseite des Wafers auf an der Stelle an der der obere Solarzellenverbinder endet. Deutlich zu erkennen ist, dass die Graf in etwa achsensymmetrisch um  $13\text{ mm}$  (also um die Mitte des Solarzellenverbinders in  $x$ -Richtung) verteilt sind. Es haben sich zwei Spannungsspitzen herausgebildet, die am Wafer unter den Ecken der Solarzellenverbinder lokalisierbar sind. Unter der Mitte der Solarzellenverbinder bildet sich ein lokales Minimum aus.

Der Plot der ersten Hauptspannung zeigt deutlich, dass der Einflussbereich der Spannungsüberhöhung klein ist.

Bei der zweiten Hauptspannung hingegen sind nur unmittelbar an der Stirnseite der Solarzellenverbinder geringe Spannungen zu lokalisieren. In einem geringen Abstand dazu beträgt die zweite Hauptspannung etwa null.

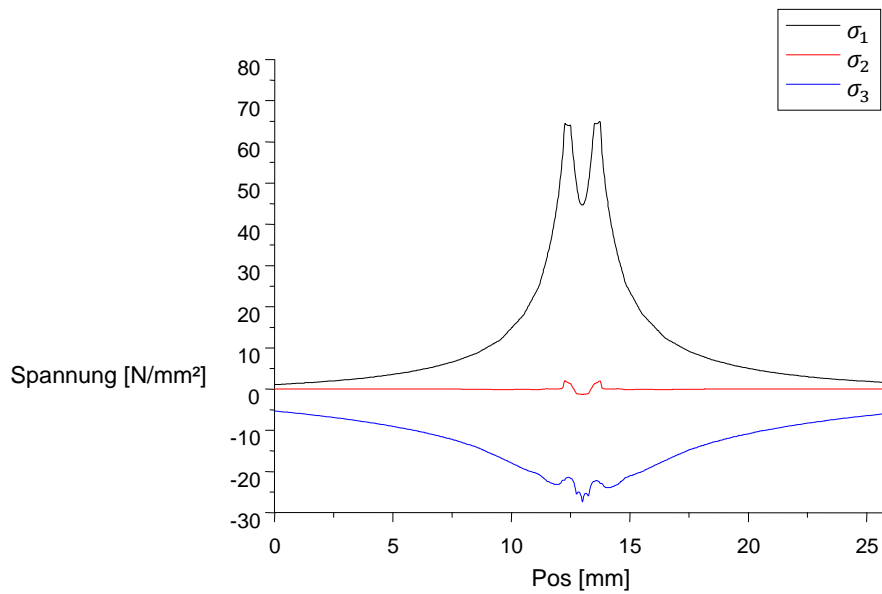


Abbildung 58: Hauptspannungen Y90

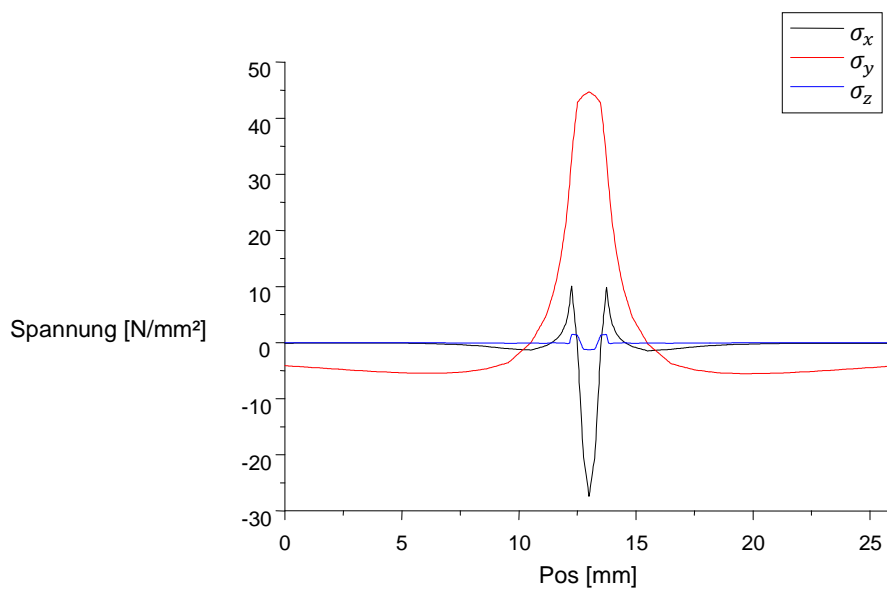


Abbildung 59: Spannungen in den Raumkoordinaten Y90

Ausgewertete Daten bei Parameterstudie "Versatz Solarzellenverbinder":

- Maximale erste Hauptspannung
- Maximale zweite Hauptspannung

**Unterseite bei  $y = 9 \text{ mm}$  (Y9U)**

Auf der gegenüberliegenden Seite des Wafers wo der obere Solarzellenverbinder endet ist der folgende Pfad der Abbildung 60 und Abbildung 61 angelegt. Er soll verdeutlichen, wie sich der Spannungseinfluss verändert, der vom Ende des Solarzellenverbinders auf die gegenüberliegende Seite des Wafers induziert wird. Die maximale erste Hauptspannung auf der Unterseite ist bei  $y = 9 \text{ mm}$  in etwa ein Fünftel so groß wie auf der Oberseite.

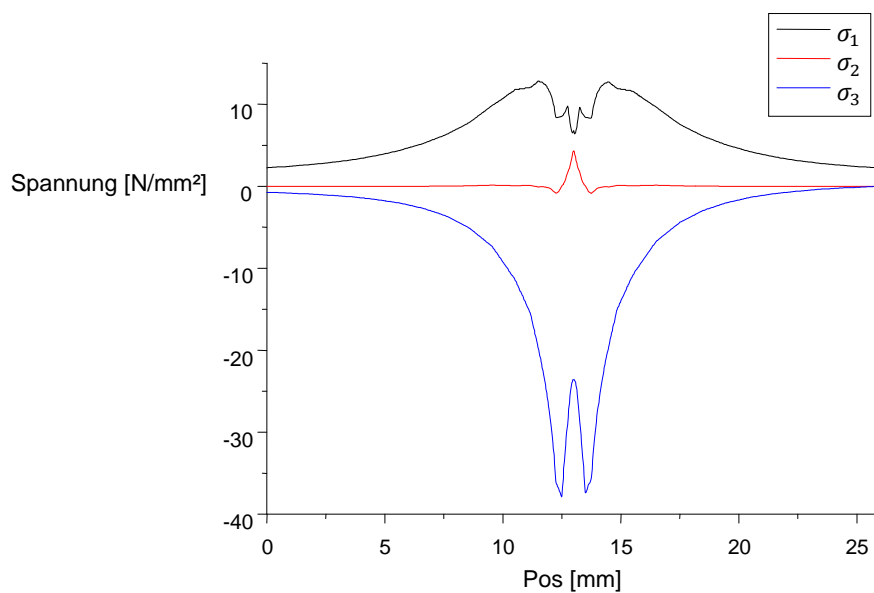


Abbildung 60: Hauptspannungen Y9U

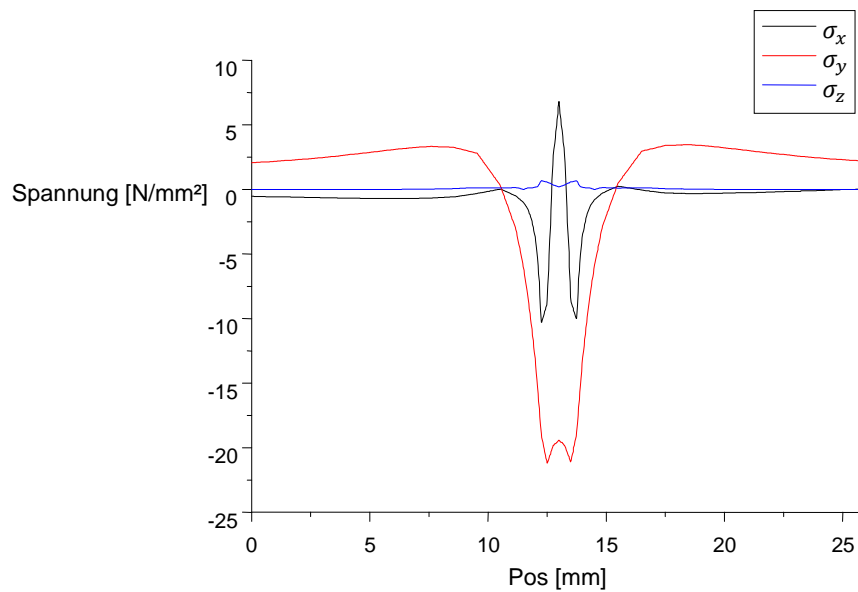


Abbildung 61: Spannungen in den Raumkoordinaten Y9U

### Unterseite bei $y = 15 \text{ mm}$ (Y15U)

Der größte Ausschlag der ersten Hauptspannung ist an der Unterseite des Wafers am Ende der unteren Solarzellenverbinder bei  $y = 15 \text{ mm}$  in Abbildung 62 zu erkennen. Damit ist dieser Ausschlag etwa 63 % größer als auf der Oberseite. Im Gegensatz zu den Pfaden bei  $y = 9 \text{ mm}$  ist auch hier auch die zweite Hauptspannung punktuell stark ausgeprägt.

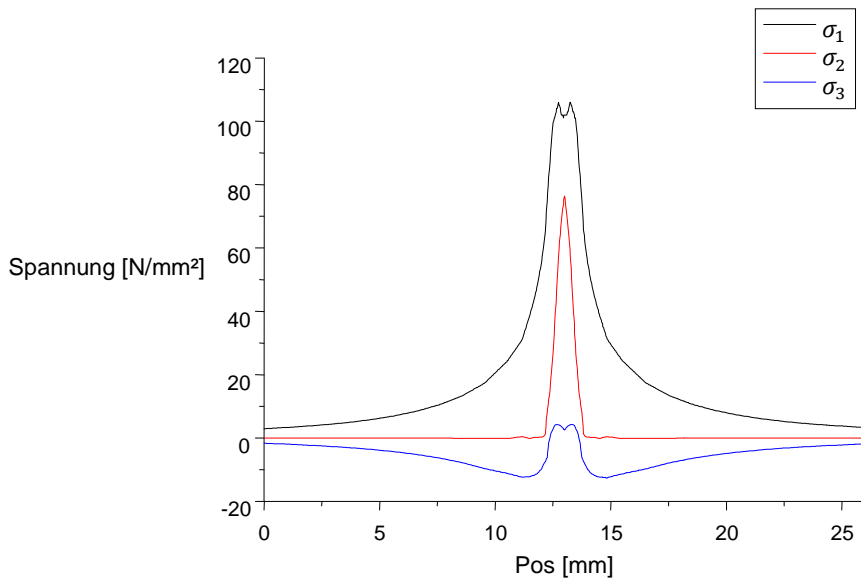


Abbildung 62: Hauptspannungen Y15U

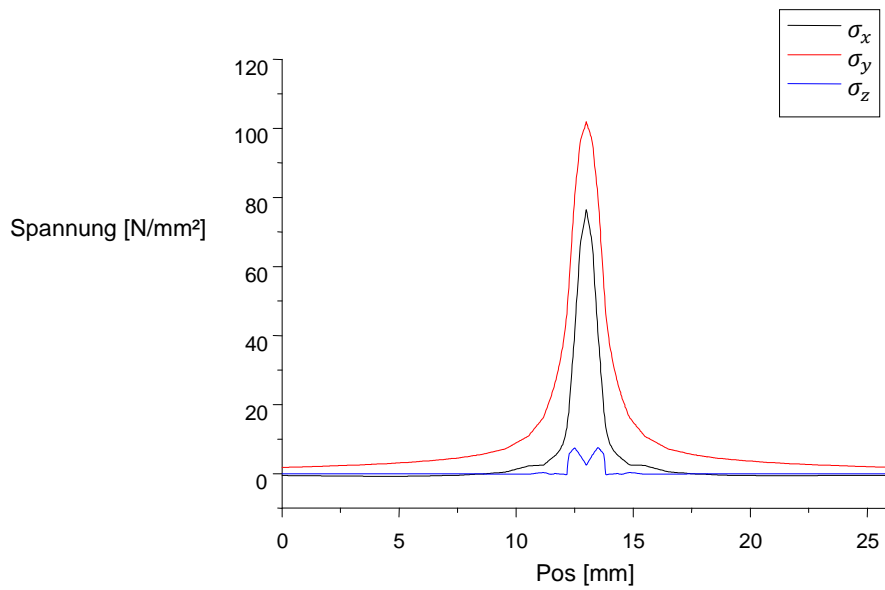


Abbildung 63: Spannungen in den Raumkoordinaten Y15U



Ausgewertete Daten bei Parameterstudie "Versatz Solarzellenverbinder":

- Maximale erste Hauptspannung
- Maximale zweite Hauptspannung

### Oberseite bei $y = 15 \text{ mm}$ (Y150)

Auf der gegenüberliegenden Seite des Wafern am Ende des unteren Solarzellenverbinders ist in Abbildung 64 erneut zu erkennen, dass sich die erste Hauptspannung wieder deutlich verringert hat. Allerdings hat die zweite Hauptspannung an dieser Stelle den größten negativen Wert.

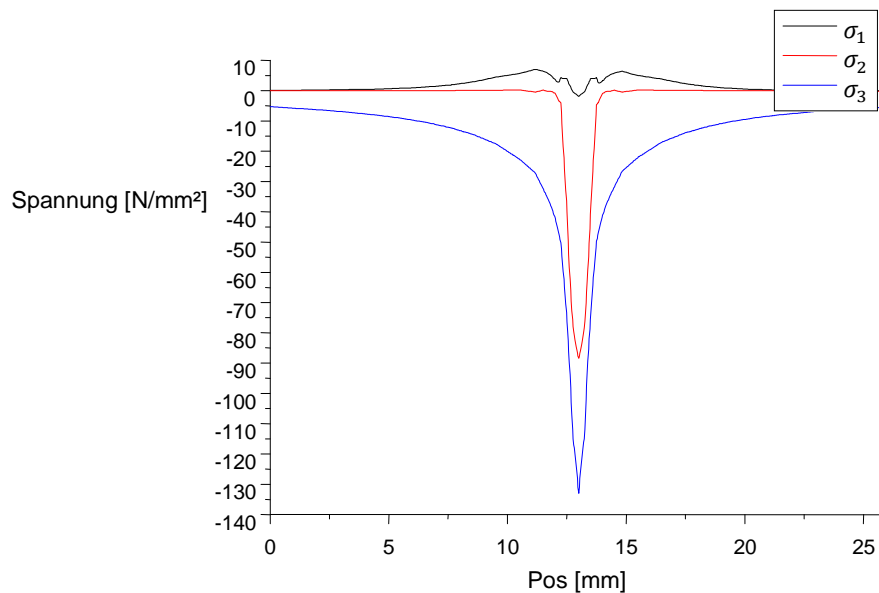


Abbildung 64: Hauptspannungen Y150

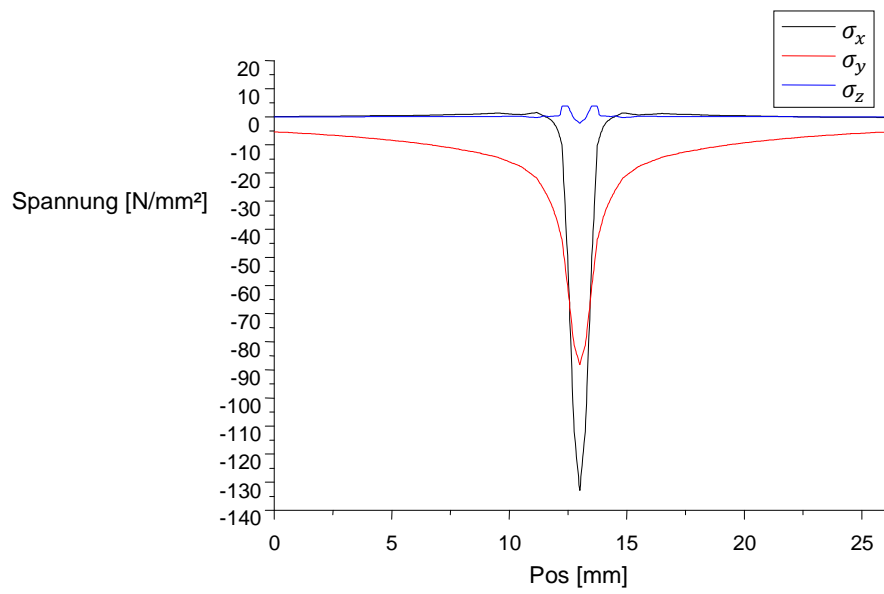


Abbildung 65: Spannungen in den Raumkoordinaten Y150

## Auswertung der Pfade

### Spannungen

Diese Pfade lassen es zu, Aussagen über die maximalen und minimalen Spannungen auf der Unter- und Oberseite des Wafers zu liefern. Die spätere Auswertung der Ergebnisse erfolgt in tabellarischer Form und verzichtet damit auf die Pfade der Spannungen und zeigt die maximalen und minimalen Werte ausgewählter Pfade auf.

Die für die Auswertung der Ergebnisse verwendeten Grafen und Spannungen können der Tabelle 3 entnommen werden. Im Anhang werden zu Vergleichszwecken die Grafen der Hauptspannungen einheitenlos dargestellt, damit ihre relativen Werte miteinander verglichen werden können.

Tabelle 3: Ausgewertete Spannungen der Pfade

	Erste Hauptspannung		Zweite Hauptspannung	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
X26O	ja	ja	ja	ja
X26U	ja	ja	ja	ja
Y9O	ja	nein	ja	nein
Y15U	ja	nein	ja	nein

### Bruchwahrscheinlichkeit

Aus der Sicht der Fertigung von Solarzellen ist es nicht unbedingt notwendig die einzelnen Spannungen über den Wafer zu kennen. Durch die Grundsätze, die in Punkt 4.6 festgelegt wurden, wird die Bruchwahrscheinlichkeit ermittelt. Der Wert der Bruchwahrscheinlichkeit lässt es zu eine Aussage über den gesamten Wafer unter den gegebenen Einflüssen zu treffen, anders als die Auswertung der Hauptspannungen der einzelnen Pfade, die nur lokale Aussagen möglich machen.

Tabelle 4: Werte für die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit

Parameter	Wert
$\sigma_0$	1.236,83 MPa mm <sup>2/m</sup>
$m$	7

### 8.3 Breite Solarzellenverbinder

Im umfangreichsten Teil der Parameterstudien werden die Auswirkungen der Breite und Dicke des Ribbons und des Loten miteinander verglichen. Dazu werden vier Konfigurationen von Kupfer [59]- und Lotdicke festgelegt, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind.

Tabelle 5: Parameter der Solarzellenverbinder

	I	II	III	IV
Kupfer [mm]	0,074	0,111	0,148	0,185
Lot [mm]	0,017	0,0255	0,034	0,0425

In der Parameterstudie durchläuft jede dieser Konfigurationen unterschiedliche Breiten der Solarzellenverbinder und die Ergebnisse der maximalen und minimalen Hauptspannungen über den festgelegten Pfaden werden in Diagramme übertragen und ausgewertet.

#### Parameterstudie I:

Dicke Kupfer = 0,074 mm

Dicke Lot = 0,017 mm

In der Parameterstudie I wird die dünnste Konfiguration der Solarzellenverbinder untersucht. Dabei wird ihre Breite in einem Bereich von 1 mm bis 2,5 mm untersucht.

#### Pfad X26O

Der Graf der maximalen ersten Hauptspannung in Abbildung 66 zeigt einen linear steigenden Verlauf. Mit steigender Breite der Solarzellenverbinder erhöht sich die maximal erreichte erste Hauptspannung des Wafers unter dem Ende des oberen Solarzellenverbinders von  $40,611 \text{ N/mm}^2$  auf  $67,681 \text{ N/mm}^2$ . Die minimale erste Hauptspannung bleibt hingegen nahezu unverändert im negativen Bereich von  $-7,796 \text{ N/mm}^2$  bis  $-4,558 \text{ N/mm}^2$ . Ebenfalls nahezu unverändert zeigt sich der Verlauf der maximalen zweiten Hauptspannung. Dabei liegen die Spannungen in einem Bereich von  $0 \text{ N/mm}^2$  bis  $1 \text{ N/mm}^2$ . Im Vergleich dazu lassen sich die Unterschiede der minimalen zweiten Hauptspannung deutlich erkennen. Hohe Druckspannungen im

Bereich von  $-73,307 \text{ N/mm}^2$  bis  $-105,698 \text{ N/mm}^2$  sind dabei in dieser Parameterstudie zu erkennen. Die Druckspannung steigt mit zunehmender Breite der Solarzellenverbinder. Ein lokales Minimum bei einer Breite von  $1,5 \text{ mm}$  ist dabei zu erkennen.

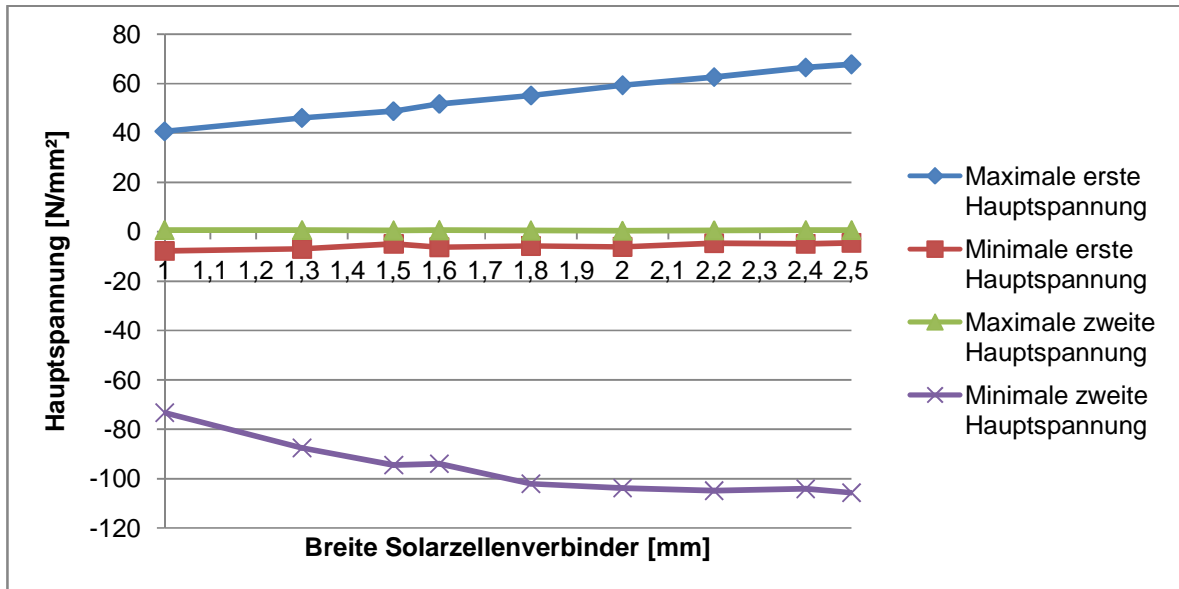


Abbildung 66: S1 und S2 des Pfades X260

## Pfad X26U

Anders als auf der Oberseite des Wafers sind auf der Unterseite (Abbildung 67) die maximalen Hauptspannungen beide positiv. Der Graf der ersten Hauptspannung steigt dabei mit der Breite  $1,0 \text{ mm}$  bis  $1,5 \text{ mm}$ . Gleich danach fällt die maximale erste Hauptspannung bei einer Breite von  $1,6 \text{ mm}$  des Solarzellenverbinders leicht ab und steigt danach wieder bis zum Ende. Insgesamt steigt die maximale erste Hauptspannung in dieser Parameterstudie von  $77,556 \text{ N/mm}^2$  bis  $108,09 \text{ N/mm}^2$ . Bei der minimalen ersten Hauptspannung ist wieder zu erkennen, dass die Druckspannungen in etwa wieder im gleichen Bereich liegen und klein sind. Im Verlauf der maximalen zweiten Hauptspannung ist kein lokales Maximum der Spannung bei einer Breite von  $1,5 \text{ mm}$  zu erkennen. Sie steigt dabei stetig von  $58,716 \text{ N/mm}^2$  bis  $85,001 \text{ N/mm}^2$ . Bei dem fallenden Verlauf der minimalen zweiten Hauptspannung ist erneut ein lokales Minimum bei einer Breite der Solarzellenverbinder von  $1,5 \text{ mm}$  zu erkennen. Hierbei liegen die Spannungen in einem Bereich von  $-41,023 \text{ N/mm}^2$  bis  $-73,824 \text{ N/mm}^2$ .

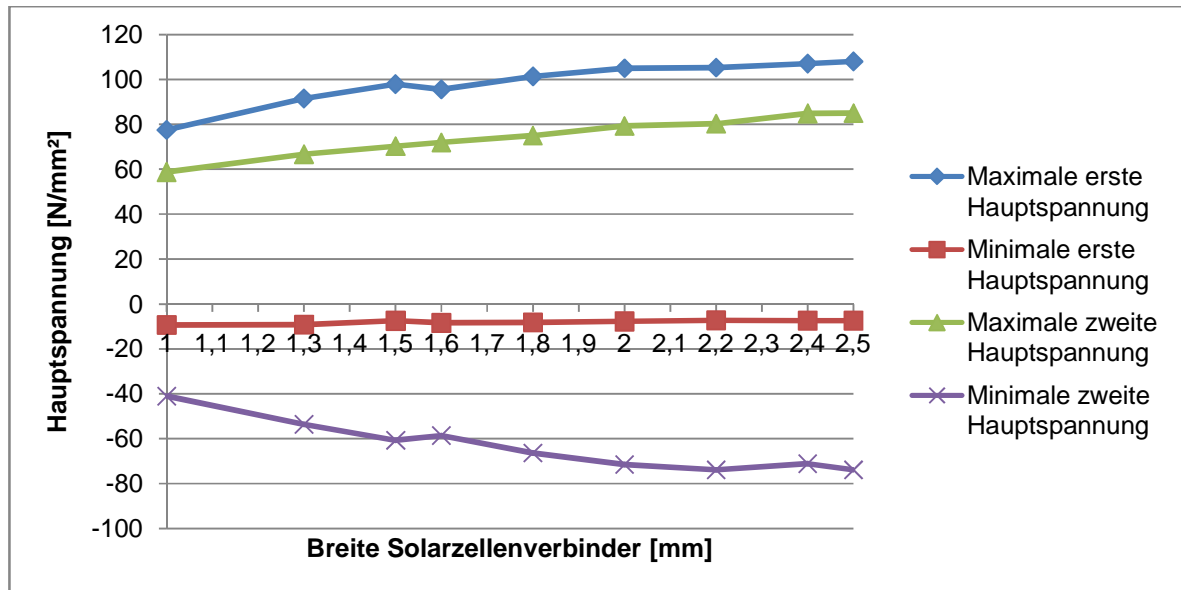


Abbildung 67: S1 und S2 des Pfades X26U

## Bruchwahrscheinlichkeit

Die Bruchwahrscheinlichkeit steigt ebenfalls bei größer werdender Breite der Solarzellenverbinder an. Damit decken sich die Ergebnisse der Abbildung 68 mit den Ergebnissen für die maximalen Hauptspannungen. Es ist dabei gut zu erkennen, dass auch in dieser Grafik ein lokales Maximum bei einer Solarzellenverbinderbreite von  $1,5\text{ mm}$  zu finden ist. Auch wenn die Werte für die Bruchwahrscheinlichkeit klein erscheinen, geben sie eine gute Aussage über das Verhalten der gesamten Solarzelle bei einem veränderten Parameter. Die Verläufe für die Bruchwahrscheinlichkeiten in den anderen Parameterstudien von "Breite Solarzellenverbinder" verlaufen analog zu diesem und werden deswegen nicht näher beschrieben und nur aufgezeigt.

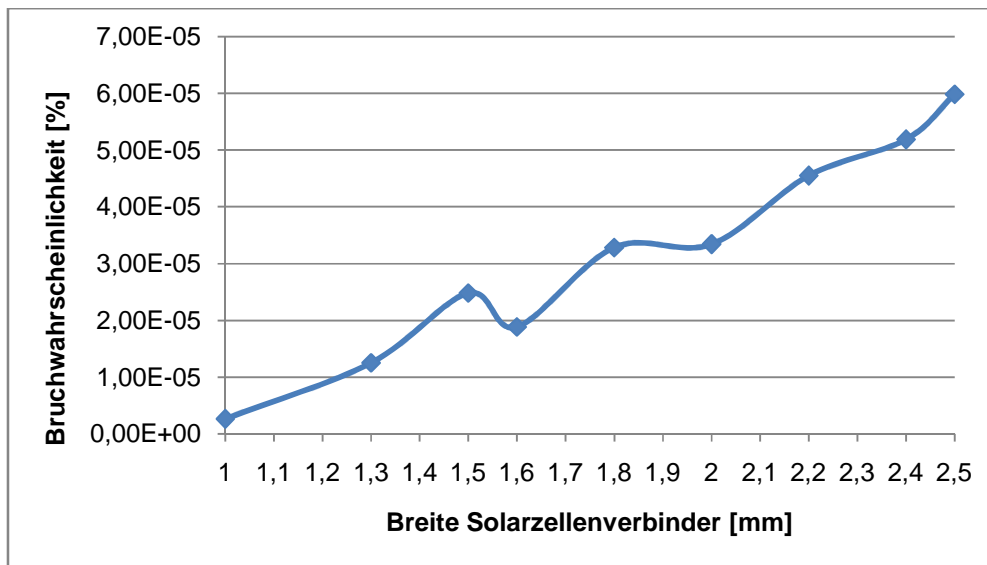


Abbildung 68: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders

### Parameterstudie II:

Dicke Kupfer = 0,111 mm

Dicke Lot = 0,0255 mm

Parameterstudie II untersucht eine etwas dickere Konfiguration der Solarzellenverbinder. Hierbei wird die Breite der Solarzellenverbinder von 1,0 mm bis 2,4 mm variiert.

### Pfad X26O

Prinzipiell ähneln die Verläufe der Hauptspannungen über der Breite der Solarzellenverbinder sehr der Parameterstudie I. Die maximale erste Hauptspannung (Abbildung 69) steigt annähernd linear und stetig mit zunehmender Breite der Solarzellenverbinder an. Dabei durchlaufen die Werte Spannungen im Bereich von  $57,326 \text{ N/mm}^2$  bis  $91,880 \text{ N/mm}^2$ . Der Verlauf der minimalen ersten Hauptspannung zeigt hingegen fast keine Variation bei zunehmender Breite der Solarzellenverbinder. Eine geringe, jedoch deutlich höhere maximale zweite Hauptspannung im Vergleich zur Parameterstudie I wurde durch die Berechnungen abgebildet. Ihr Bereich liegt bei  $2,417 \text{ N/mm}^2$  bis  $11,547 \text{ N/mm}^2$ . Die Druckspannungen der minimalen zweiten

Hauptspannung sind sehr hoch und steigen mit zunehmender Breite der Solarzellenverbinder.

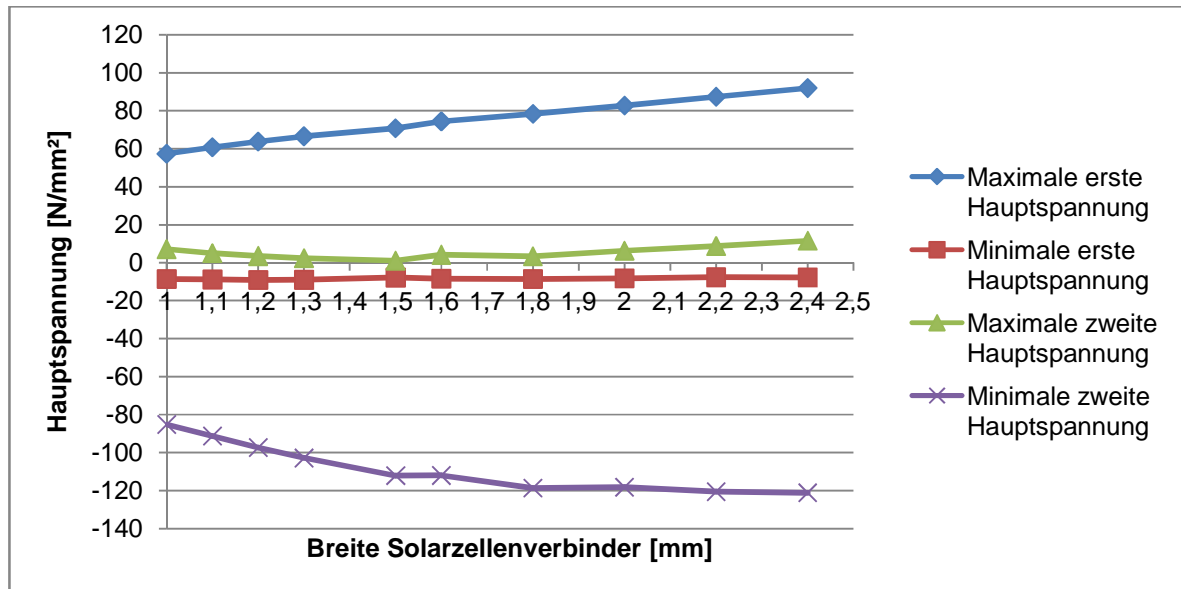


Abbildung 69: S1 und S2 des Pfades X260

### Pfad X26U

Auch in der Parameterstudie II steigen die erste und zweite Hauptspannung (Abbildung 70) an der Unterseite deutlich bei zunehmender Breite der Solarzellenverbinder. Hierbei zeigt sich wieder ein lokales Maximum der Spannungen bei 1,5 mm breiten Solarzellenverbinder. Die maximale erste Hauptspannung weist dabei Werte von  $57,326 \text{ N/mm}^2$  bis  $91,880 \text{ N/mm}^2$  auf und bei der maximalen zweiten Hauptspannung von  $75,457 \text{ N/mm}^2$  bis  $105,790 \text{ N/mm}^2$ . Nahezu unverändert bei ca.  $-10 \text{ N/mm}^2$  bleibt die minimale erste Hauptspannung. Die größer werdenden Druckspannungen der minimalen zweiten Hauptspannung besitzen wieder ein lokales Maximum bei einer Breite von 1,5 mm der Solarzellenverbinder.



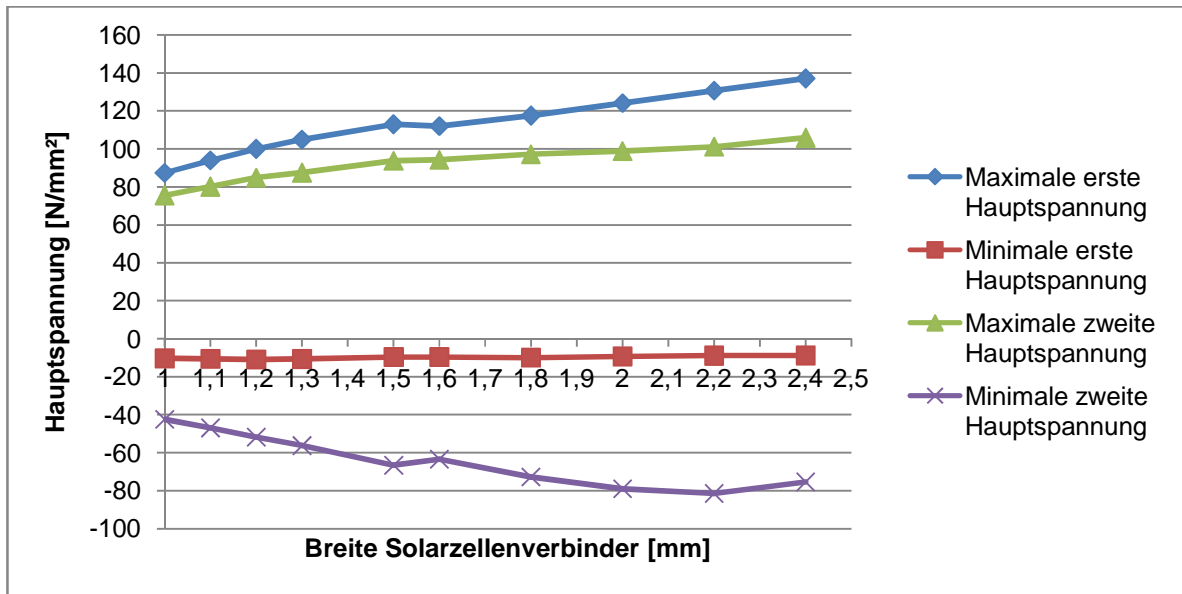


Abbildung 70: S1 und S2 des Pfades X26U

### Bruchwahrscheinlichkeit

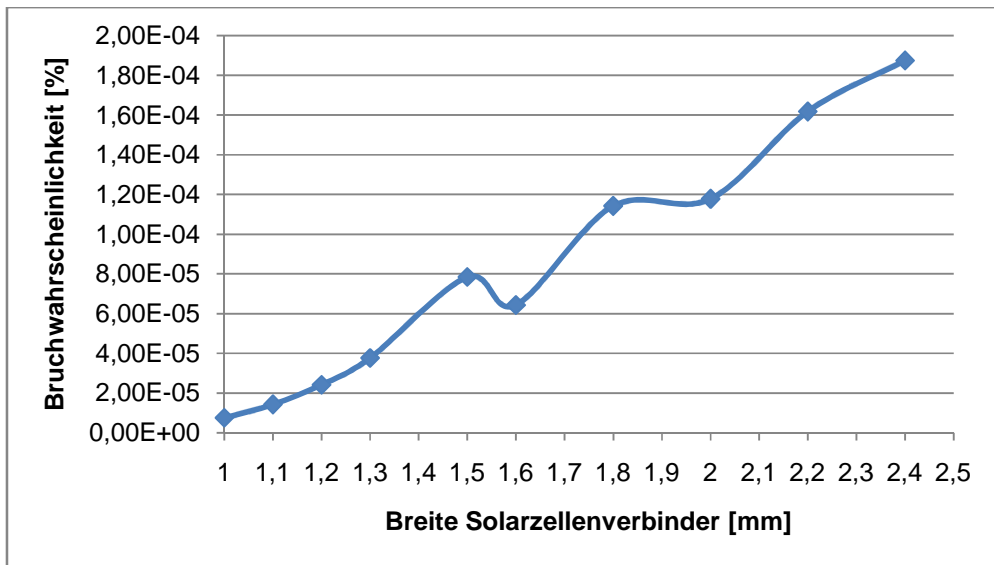


Abbildung 71: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders

### Parameterstudie III:

Dicke Kupfer = 0,148 mm

Dicke Lot = 0,034 mm

In der Parameterstudie III wird die zweitdickste Konfiguration der Solarzellenverbinder untersucht. Dabei durchläuft die Breite Werte von 1,0 mm bis 2,5 mm.

### Pfad X26O

Ein nahezu linearer Anstieg der maximalen ersten Hauptspannung (Abbildung 72) ist auch in dieser Parameterstudie zu erkennen. Sie erreicht dabei die maximalen Werte von  $72,244 \text{ N/mm}^2$  bis  $111,600 \text{ N/mm}^2$ . Die minimale erste Hauptspannung zeigt hingegen kaum Veränderungen im Verlauf. Erneut ist die maximale zweite Hauptspannung größer als in der vorherigen Parameterstudie mit Werten von  $10,740 \text{ N/mm}^2$  bis  $25,432 \text{ N/mm}^2$ . Der Verlauf der minimalen zweiten Hauptspannung zeigt wieder steigende Druckspannungen mit einem lokalen Maximum bei 1,5 mm breiten Solarzellenverbindern.

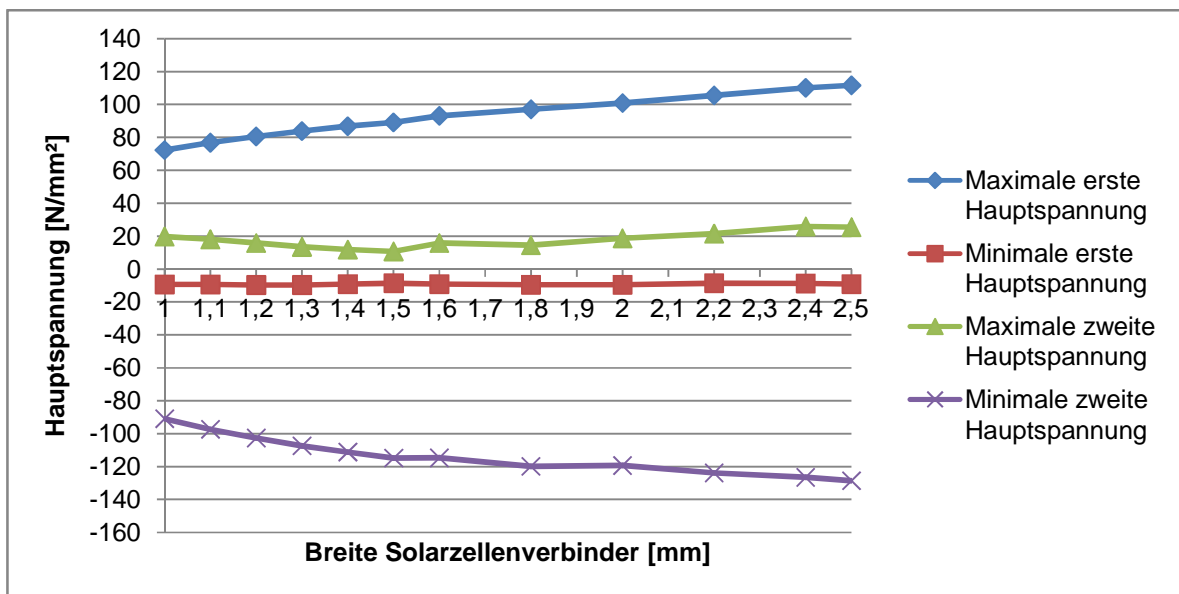


Abbildung 72: S1 und S2 des Pfades X26O

### Pfad X26U

Auf der Unterseite des Wafers zeigen die maximalen ersten beiden Hauptspannungen (Abbildung 73) wieder einen steigenden Verlauf der Spannungen bei zunehmender Breite der Solarzellenverbinder. Erneut lässt sich bei dem Verlauf der maximalen zweiten Hauptspannung ein lokales Maximum bei 1,5 mm breiten Solarzellenverbindern erkennen. Die Werte der maximalen ersten Hauptspannung reichen von  $103,900 \text{ N/mm}^2$  bis  $157,95 \text{ N/mm}^2$  und die der maximalen zweiten Hauptspannung von  $82,197 \text{ N/mm}^2$

$mm^2$  bis  $106,790 N/mm^2$ . In etwa unverändert bleibt der Verlauf der minimalen ersten Hauptspannung, die leicht im Druckbereich liegt. Deutliche Druckspannung zeigt die minimale zweite Hauptspannung auf, die wieder bei einer Solarzellenverbinderbreite von  $1,5 mm$  ein lokales Maximum aufweist.

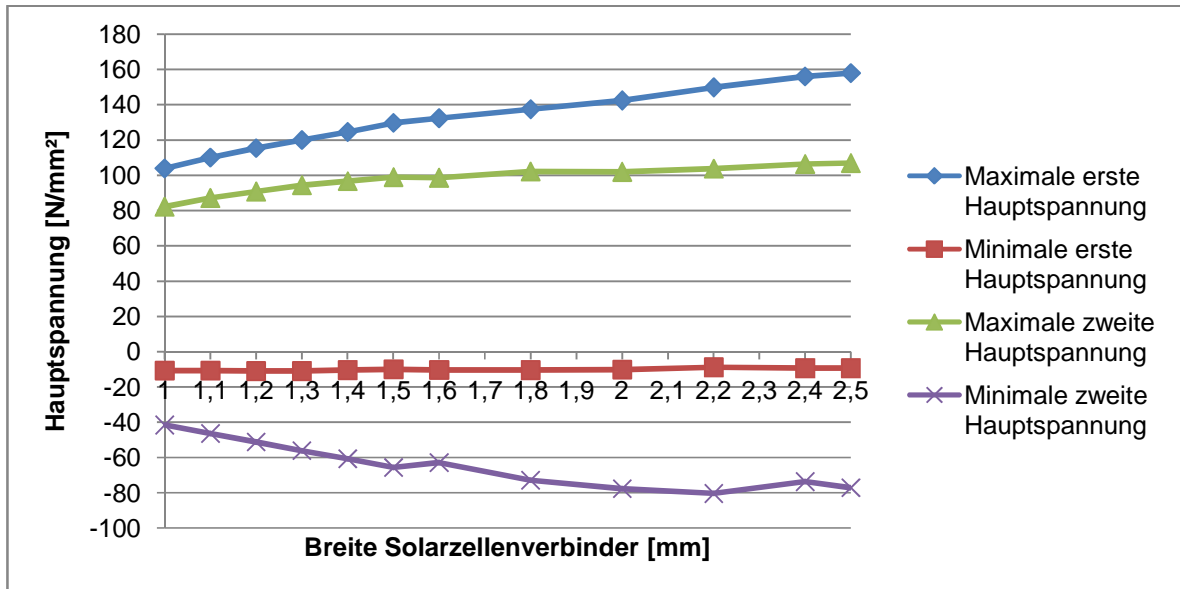


Abbildung 73: S1 und S2 des Pfades X26U

### Bruchwahrscheinlichkeit

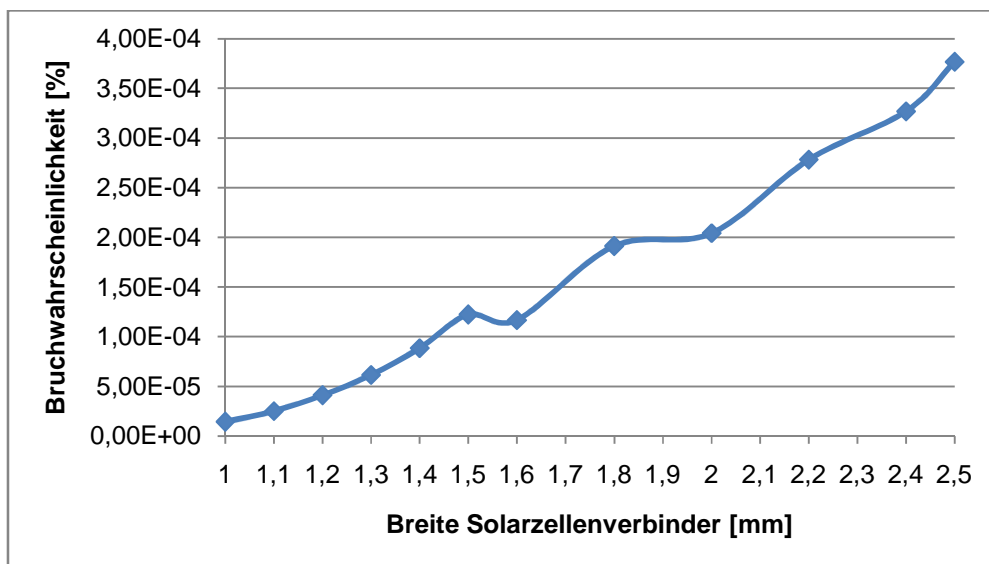


Abbildung 74: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders

### Parameterstudie IV:

Dicke Kupfer = 0,185 mm

Dicke Lot = 0,0425 mm

In der Parameterstudie mit dem dicksten Solarzellenverbinder wird die Breite der Solarzellenverbinder nur in einem Bereich von 1,0 mm bis 1,6 mm untersucht.

### Pfad X260

In der Parameterstudie IV, die durch die Abbildung 75 dargestellt wird, steigt der Verlauf der maximalen ersten Hauptspannung erneut linear an. Allerdings fällt die Spannung bei einer Breite von 1,5 mm der Solarzellenverbinder wieder leicht. Ihre Werte liegen zwischen  $85,748 \text{ N/mm}^2$  und  $109,97 \text{ N/mm}^2$ . Die minimale erste Hauptspannung bleibt hingegen etwa gleich über der Parameterstudie. Den deutlich höchsten Wert für die maximale zweite Hauptspannung mit Werten von  $24,947 \text{ N/mm}^2$  bis  $31,719 \text{ N/mm}^2$  hat die vierte Parameterstudie hervorgebracht. Die Werte für die minimale zweite Hauptspannung liegen zwischen  $-93,338 \text{ N/mm}^2$  und  $-118,68 \text{ N/mm}^2$  mit einem lokalen Minimum bei 1,5 mm breiten Solarzellenverbindern.

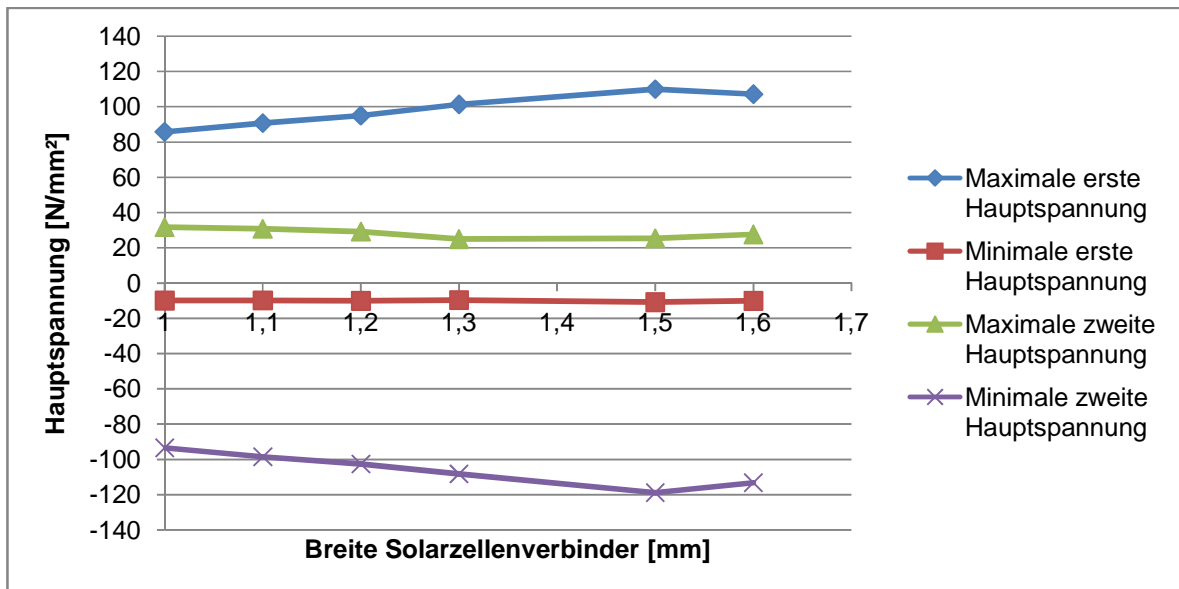


Abbildung 75: S1 und S2 des Pfades X260

## Pfad X26U

Auch in dieser Parameterstudie steigen die maximale erste und zweite Hauptspannung (Abbildung 76) bei steigender Breite der Solarzellenverbinder. Das Maximum ihrer Spannungen ist bei den 1,5 mm breiten Solarzellenverbinder anzutreffen. Ihre Werte reichen bei der maximalen ersten Hauptspannung von  $116,450 \text{ N/mm}^2$  bis  $148,180 \text{ N/mm}^2$  und bei der zweiten maximalen Hauptspannung von  $76,205 \text{ N/mm}^2$  bis  $94,937 \text{ N/mm}^2$ . Konstant ist wieder der Verlauf der minimalen ersten Hauptspannungen bei Werten um  $-10 \text{ N/mm}^2$ . Die Druckspannungen der minimalen zweiten Hauptspannung erreichen ihr Maximum ebenfalls bei einer Breite der Solarzellenverbinder von 1,5 mm. Ihre Werte liegen zwischen  $-43,413 \text{ N/mm}^2$  und  $-67,508 \text{ N/mm}^2$ .

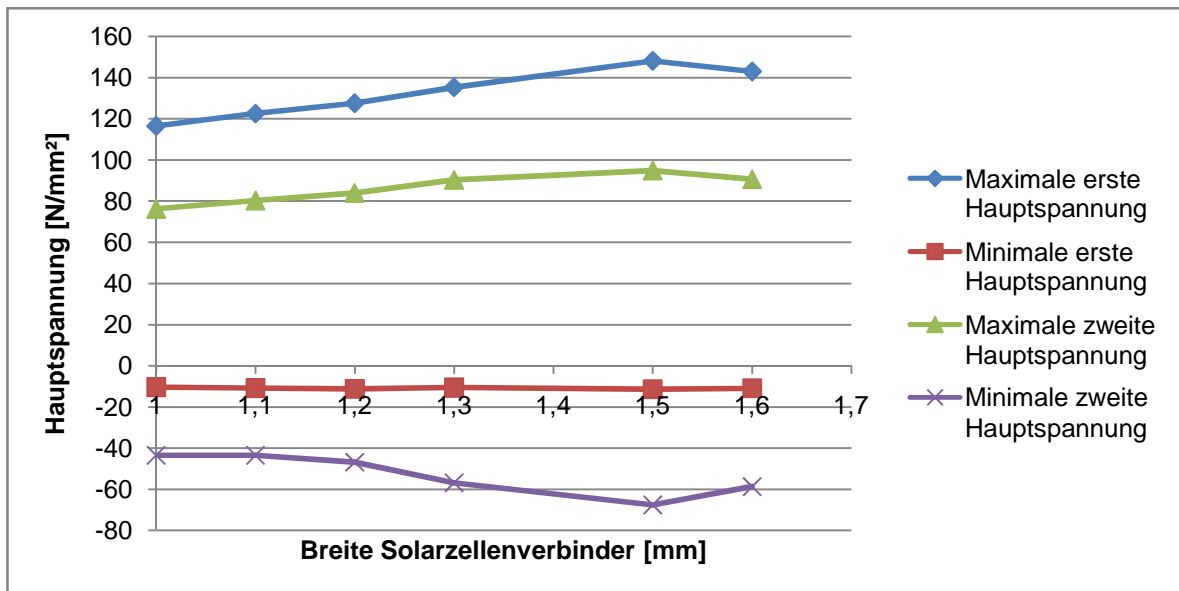


Abbildung 76: S1 und S2 des Pfades X26U

## Bruchwahrscheinlichkeit

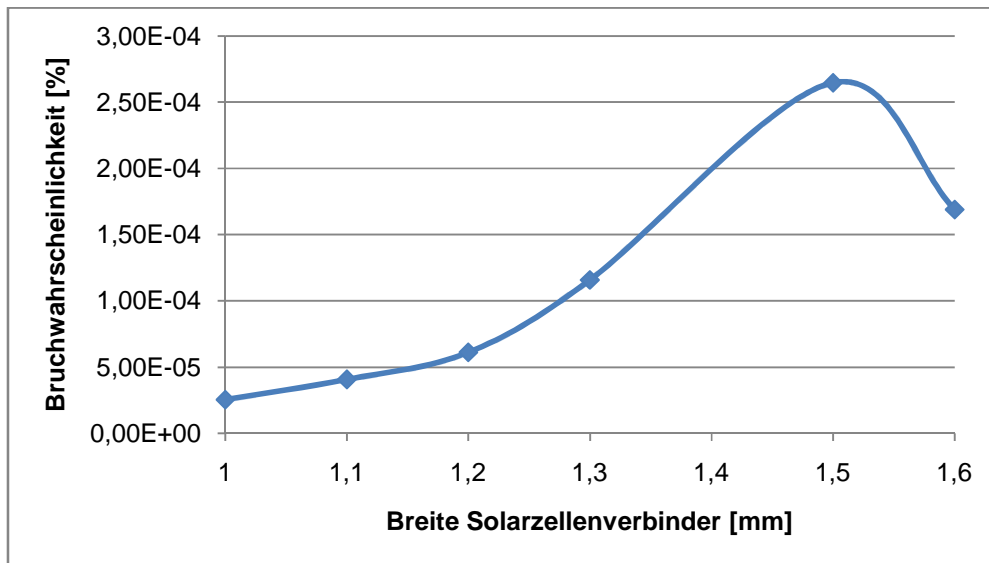


Abbildung 77: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders

## Vergleich der vier Parameterstudien

Um die Ergebnisse der ersten vier Parameterstudien miteinander zu vergleichen, werden aus jeder Parameterstudie die Spannungswerte für eine Solarzelle mit 1,3 mm breiten Solarzellenverbindern herausgezogen. Die Spannungswerte für Ober- und Unterseite werden miteinander verglichen und Schlussfolgerungen daraus gezogen wie sich die Dicke des Kupfers auf die Ergebnisse niederschlägt.

### Pfad X26O

Wie zu erwarten zeigt sich bei der ersten maximalen Hauptspannung in Abbildung 78 ein linearer Anstieg der Spannung bei größer werdender Dicke des Kupfers. Die maximale zweite Hauptspannung, die in den einzelnen Parameterstudien eher gleich geblieben ist, erhöht sich stetig bei zunehmender Dicke des Kupfers. Der Einfluss der Kupferdicke ist also ausschlaggebend für die maximale zweite Hauptspannung auf der Oberseite des Wafers. Die minimale erste Hauptspannung hingegen verändert sich auch in dieser Gegenüberstellung nicht. Sie bleibt über die Parameterstudien hinweg annähernd gleich. Bei der minimalen zweiten Hauptspannung ist der Trend zu erkennen, dass sie mit steigender Kupferdicke abnimmt.

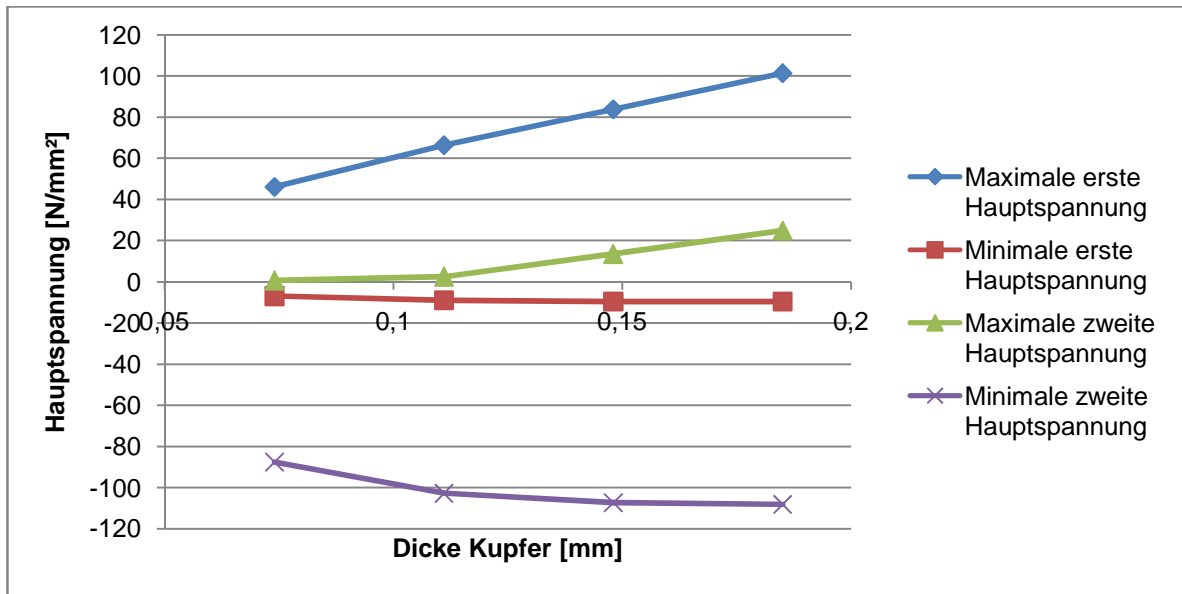


Abbildung 78: S1 und S2 des Pfades X260 im Vergleich "Breite Solarzellenverbinder"

### Pfad X26U

Auf der Unterseite des Wafers ergibt sich ein leicht anderes Bild (Abbildung 79). Zwar steigen die maximalen ersten Hauptspannungen proportional zur Kupferdicke, jedoch ist dieser Trend bei der maximalen zweiten Hauptspannung nicht eindeutig. Diese sinkt bei Parameterstudie IV im Vergleich zur Parameterstudie III. Auf die minimale erste und zweite Hauptspannung auf der Unterseite des Wafers hat die Dicke des Kupfers keinen Einfluss.

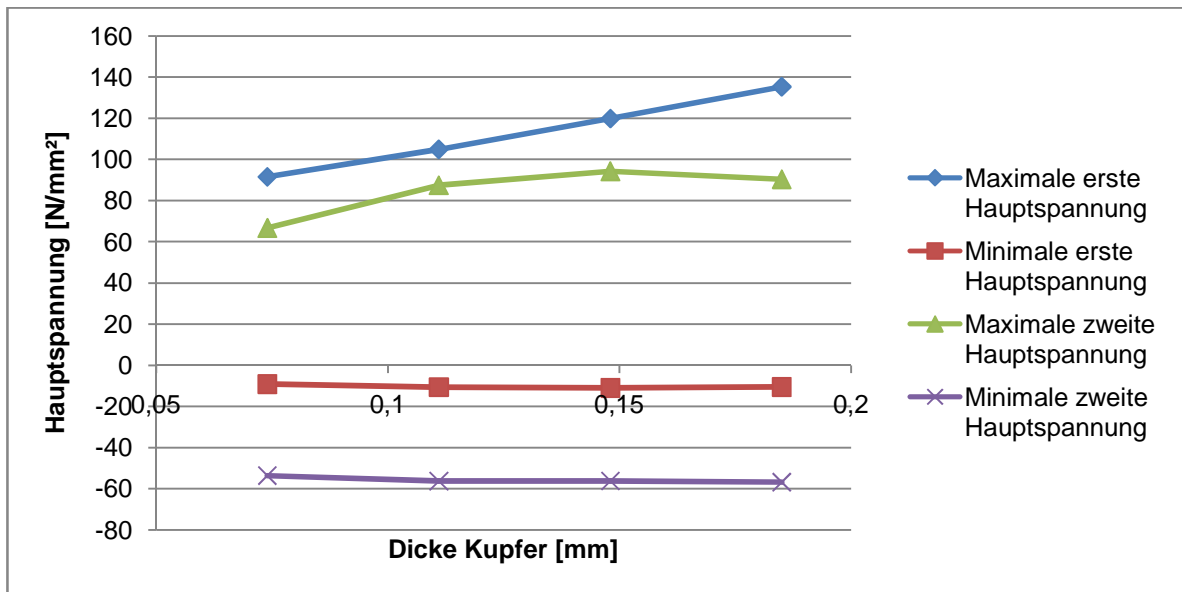


Abbildung 79: S1 und S2 des Pfades X26U im Vergleich "Breite Solarzellenverbinder"

## Bruchwahrscheinlichkeit

Der Verlauf der Bruchwahrscheinlichkeit bei zunehmender Dicke des Kupfers ist stetig steigend wie Abbildung 80 zeigt.

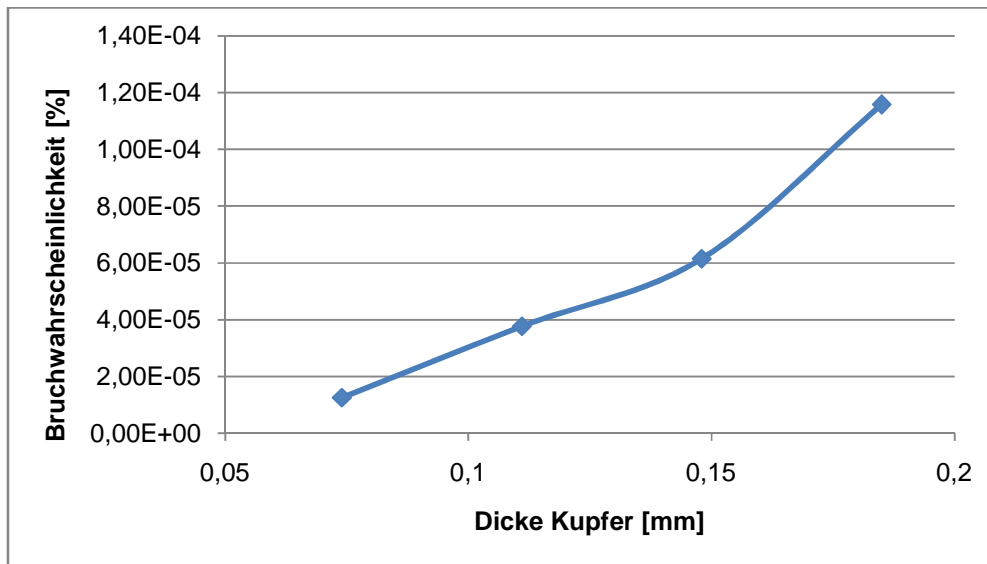


Abbildung 80: Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Dicke des Kupfers

## Erklärung für die lokalen Maxima bei einer Breite der Solarzellenverbinder von 1,5 mm

Als möglicher Grund für die lokalen Maxima und Minima der Parameterstudien könnte folgender Ansatz dienen. Da die Busbars der Solarzelle auf der Oberseite eine Breite von 1,5 mm haben, liegen die Kanten der Solarzellenverbinder mit der gleichen Breite übereinander. Dadurch können sich die Spannungen nicht Schritt für Schritt abbauen. Es entstehen also nicht zwei kleine rechteckige Kerben zwischen dem Solarzellenverbinder und dem Busbar, sowie zwischen Busbar und Wafer, sondern eine große Kerbe zusammengesetzt aus Solarzellenverbinder und Busbar die senkrecht zum Wafer stehen. Die Abbildung 81 zeigt zuerst einen Solarzellenverbinder der in der Breite kleiner ist als der Busbar und danach einen der die gleich Breite hat.



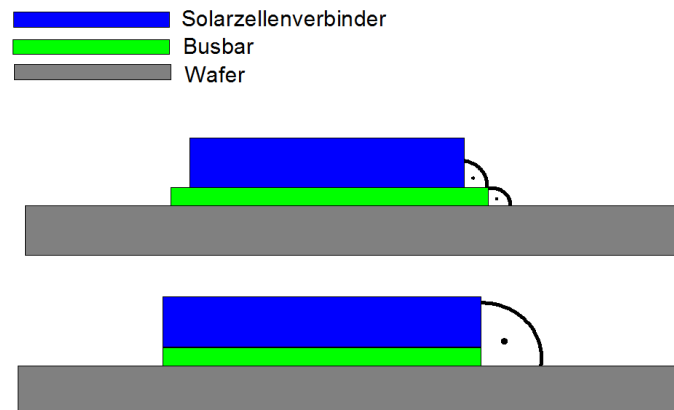


Abbildung 81: Skizze Kerben

Ein alternativer Ansatz wird in Abbildung 82 aufgezeigt. Hier liegt die Ursache für die Spannungserhöhung darin, dass die Spannungen die vom Solarzellenverbinder in das System induziert werden, in einen geringeren Bereich über den Busbar abgebaut werden können. Dies bedeutet, dass im linken Bild (Breite Solarzellenverbinder = Breite Busbar) der Busbar nicht so stark auf die Verformung eingehen kann und damit die Spannungen stärker auf den Wafer geleitet werden. Im rechten Bild kann der Busbar mit einer erhöhten Verformung reagieren und mindert so die Spannungen, die auf den Wafer übertragen werden.

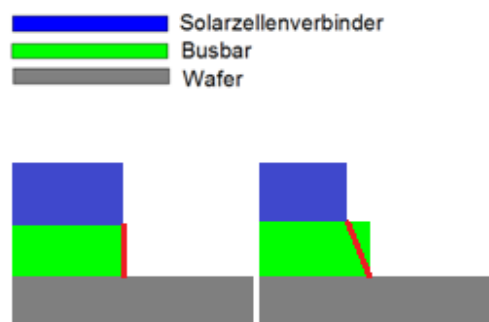


Abbildung 82: Skizze Verformung

### Ergebnisse der Parameterstudie „Breite Solarzellenverbinder“:

- Maximale erste Hauptspannung abhängig vom Querschnitt des Kupfers im Solarzellenverbinder

- Maximale zweite Hauptspannung der Oberseite ist nur abhängig von der Dicke des Kupfers im Solarzellenverbinder
- Minimale erste Hauptspannung bleibt über die Parameterstudien nahezu gleich
- Die Breite der Solarzellenverbinder sollte nicht gleich der Breite Busbars sein (höhere Spannungen)
- Dünnere Solarzellenverbinder (Breite und Dicke) verringern die Spannungen im Wafer

## 8.4 Temperaturverlauf

In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit die Gestaltung der Abkühlkurve Einfluss auf die Spannungen im Wafer hat. Durch das zeit- und temperaturabhängige Kriechen des Zinn-Blei-Lotes sollte es möglich sein, die Spannungen im Wafer zu verringern, in dem die Abkühlung langsamer erfolgt. Aus diesem Grund wurden sechs weitere Abkühlkurven entwickelt, wobei zwei davon den Abkühlvorgang schneller durchfahren und vier die Abkühlung verzögern. Die Tabelle 6 zeigt die veränderten Abkühlkurven.

Tabelle 6: Veränderte Abkühlkurven

Abkühlzeit	60%	80%	100%	120%	140%	200%	300%
Temperatur [°C]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]
183	0	0	0	0	0	0	0
150	1,08	1,44	1,8	2,16	2,52	3,6	5,4
125	2,22	2,96	3,7	4,44	5,18	7,4	11,1
100	4,44	5,92	7,4	8,88	10,36	14,8	22,2
75	8,52	11,36	14,2	17,04	19,88	28,4	42,6
20	26,22	34,96	43,7	52,44	61,18	87,4	131,1

Als Grundlage für die Berechnung wurde ein Standardmodell definiert, welches eine Breite für Ribbon und Lot von 1,3 mm, einer Dicke des Kupfers von 0,111 mm und einer Lotdicke von 0,0255 mm aufweist.

### Pfad X26O

Die Veränderung der Abkühlkurve konnte die Annahme, dass die maximalen und minimalen Hauptspannungen geringer werden nicht bestätigen. Im Vergleich der einzelnen Abkühlkurven zeigen sich fast keine Abweichungen voneinander.

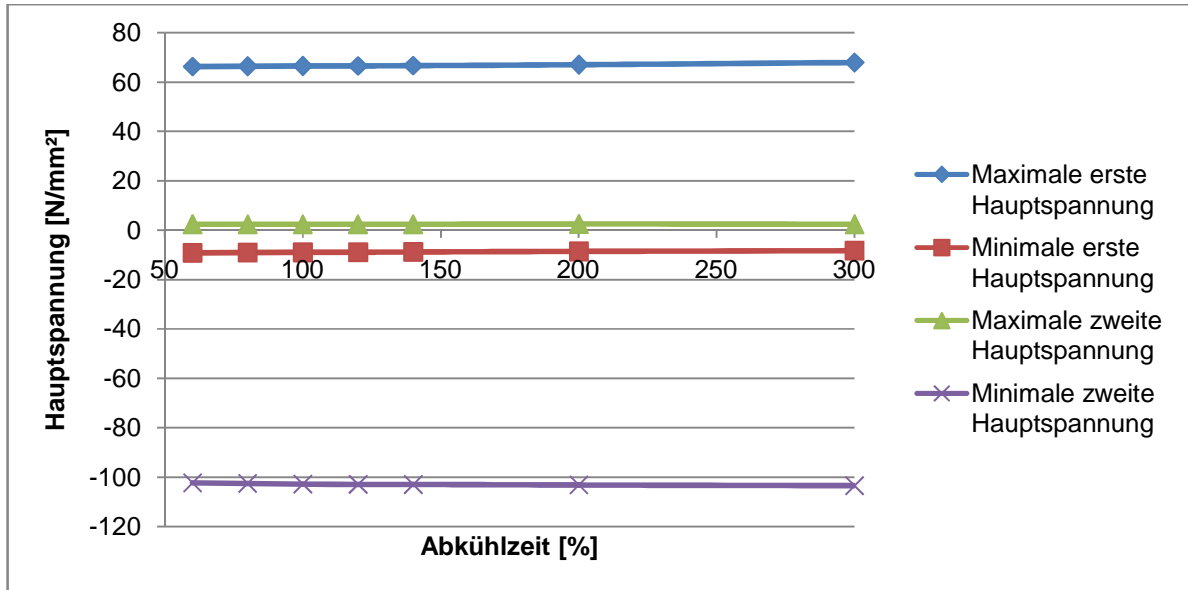


Abbildung 83: S1 und S2 des Pfades X260 über der Abkühlzeit

### Pfad X26U

Gleiches gilt auch für die Unterseite des Wafers. Die Unterschiede in den maximalen und minimalen Hauptspannungen sind vernachlässigbar klein.

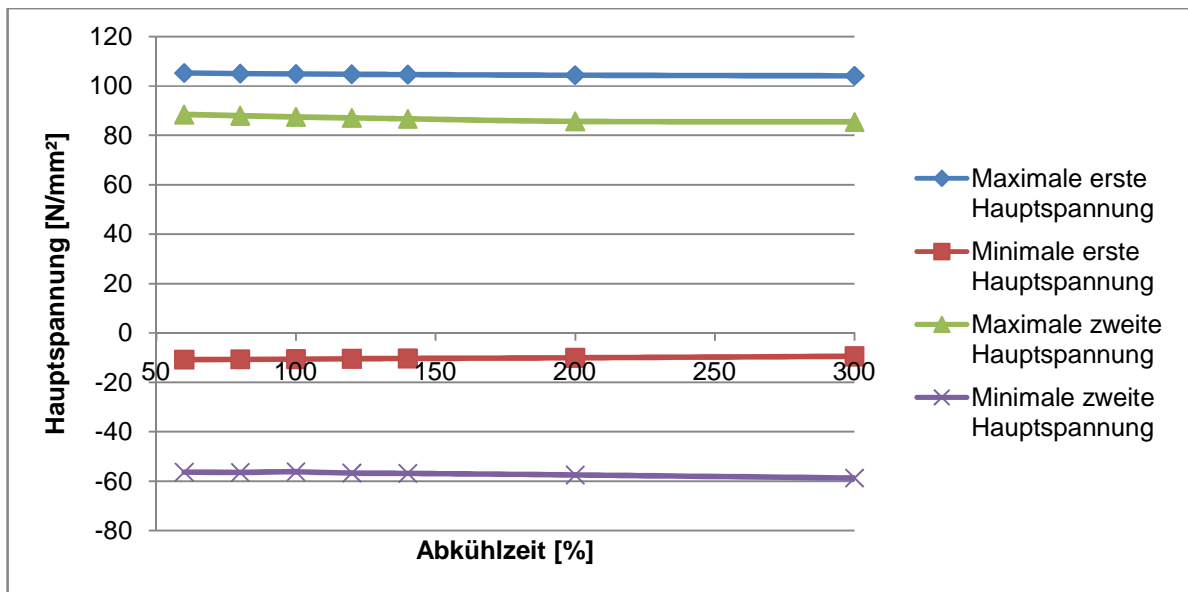


Abbildung 84: S1 und S2 des Pfades X26U über der Abkühlzeit

## Bruchwahrscheinlichkeit

Beim Verlauf der Bruchwahrscheinlichkeit über der Abkühlzeit ergibt sich der Graf der Abbildung 85, der sich nicht mit den maximalen Hauptspannungen deckt. Bei länger andauernder Abkühlung verringert sich die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch des Wafers stetig, obwohl die maximalen Hauptspannungen in etwa gleich bleiben.

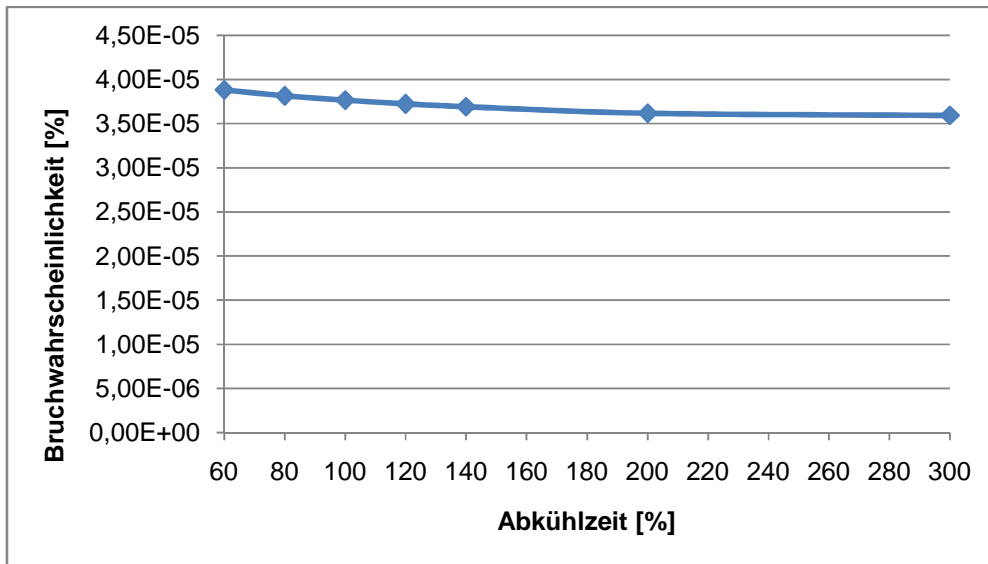


Abbildung 85: Bruchwahrscheinlichkeit über der Abkühlzeit

Ein Grund hierfür könnte sein, dass sich die in Punkt 4.6 erwähnte effektive Fläche verringert, die die Grundlage für die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit bildet. Vor allem auf der Oberseite wird die effektive Fläche leicht kleiner. Der Einflussbereich der Zugspannungen, die durch den Lötprozess in den Wafer gelangen werden also geringer, wenn die Abkühlung länger dauert. Abbildung 86 zeigt den Verlauf der effektiven Fläche über der Abkühlzeit.

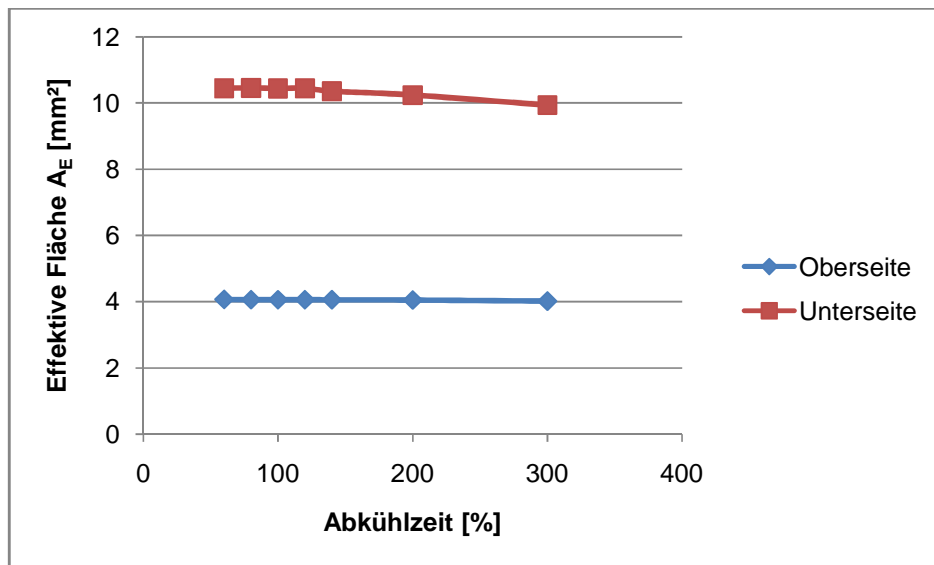


Abbildung 86: Effektive Fläche über der Abkühlzeit

## 8.5 Lotdicke

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die inneren Spannungen des Wafers könnte die Lotdicke sein. Aus diesem Grund befasst sich dieser Abschnitt damit wie sich die Spannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit zur Lotdicke verhalten. In dieser Parameterstudie wird die Lotdicke von  $0,02\text{ mm}$  bis  $0,15\text{ mm}$  variiert. Zu erwarten ist, dass bei einem dickeren Lot die Wechselwirkungen von Kupfer und Silizium abnehmen und so die Spannungen geringer werden. Für die Berechnung der Parameterstudie dient wieder das Standardmodell, bei dem die Lotdicke variiert wird.

### Pfad X26O

Anders als erwartet steigen die maximale erste und zweite Hauptspannung bei dicker werdenden Lot in etwa linear an. Die minimale erste Hauptspannung hingegen wird von der Lotdicke nicht beeinflusst. Bei der minimalen zweiten Hauptspannung gibt es leichte Veränderungen wobei sie bei einer Lotdicke von  $0,1\text{ mm}$  ihr Maximum hat.

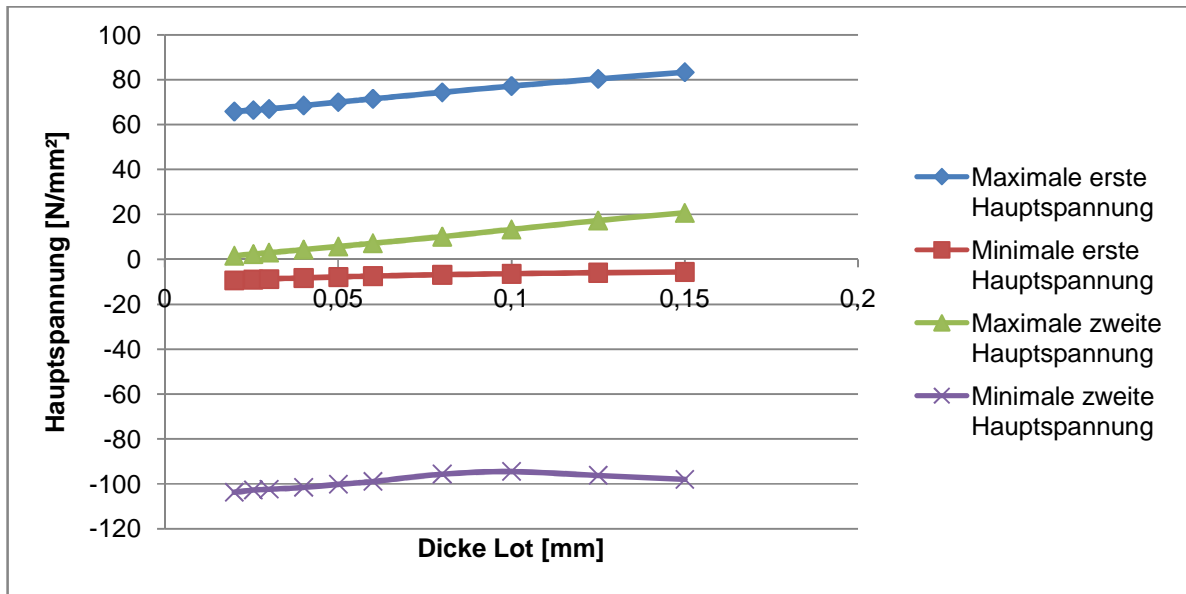


Abbildung 87: S1 und S2 des Pfades X260 "Lotdicke"

## Pfad X26U

Die Unterseite des Wafers reagiert auf die Erhöhung der Lotdicke zuerst mit einem leichten Abfall der maximalen ersten Hauptspannung (Abbildung 88) bis zu einer Lotdicke von  $0,04 \text{ mm}$ . Danach steigt sie in etwa linear an.

Der Verlauf der maximalen zweiten Hauptspannung ist gegenläufig. Er steigt bis zu einer Lotdicke von  $0,05 \text{ mm}$  und fällt danach ab. Bei den minimalen Hauptspannungen zeigt sich die erste Hauptspannung wieder unbeeinflusst und die minimale zweite Hauptspannung steigt mit größer werdender Lotdicke.

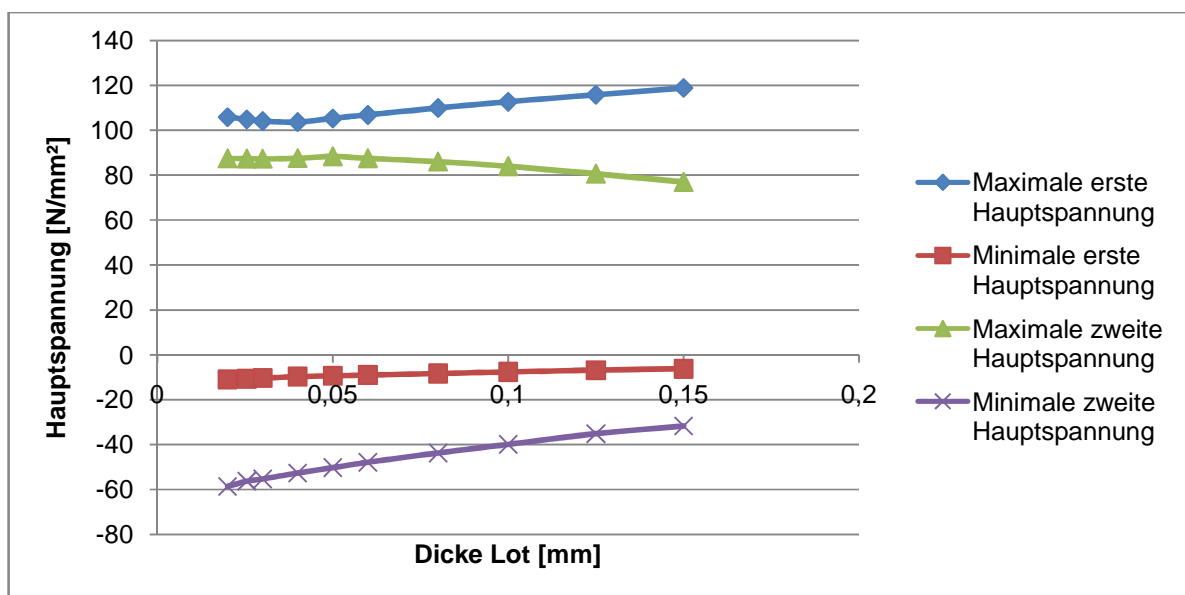


Abbildung 88: S1 und S2 des Pfades X26U "Lotdicke"

## Bruchwahrscheinlichkeit

Die Bruchwahrscheinlichkeit in Abbildung 89 nimmt bis zu einer Lotdicke von  $0,1 \text{ mm}$  ab und steigt danach wieder leicht. Dies widerspricht den größer werdenden Hauptspannungen, die sich bei einem dickeren Lot ergeben.

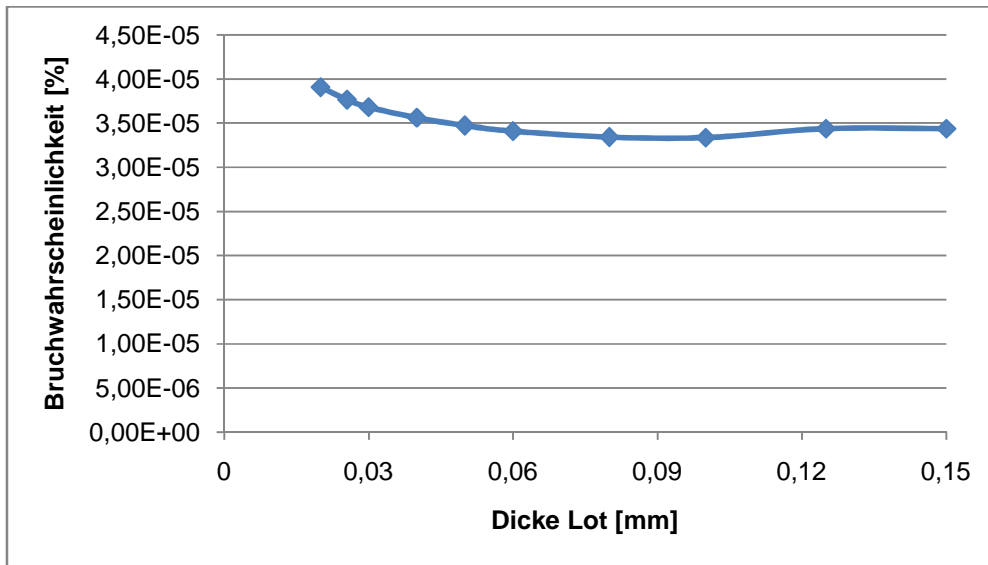


Abbildung 89: Bruchwahrscheinlichkeit über der Lotdicke

Aus diesem Grund wird geschaut, wie sich die effektive Fläche der Ober- und Unterseite verhalten (Abbildung 90). Die Grafen zeigen deutlich, dass die effektive Fläche auf beiden Seiten abnimmt, wobei die effektive Fläche der Unterseite schneller sinkt. Ein dickeres Lot erhöht also die Hauptspannungen, die durch den Lötprozess in den Wafer gebracht werden, jedoch verringert es den Einwirkungsbereich der Spannungen, die zum Bruch führen.

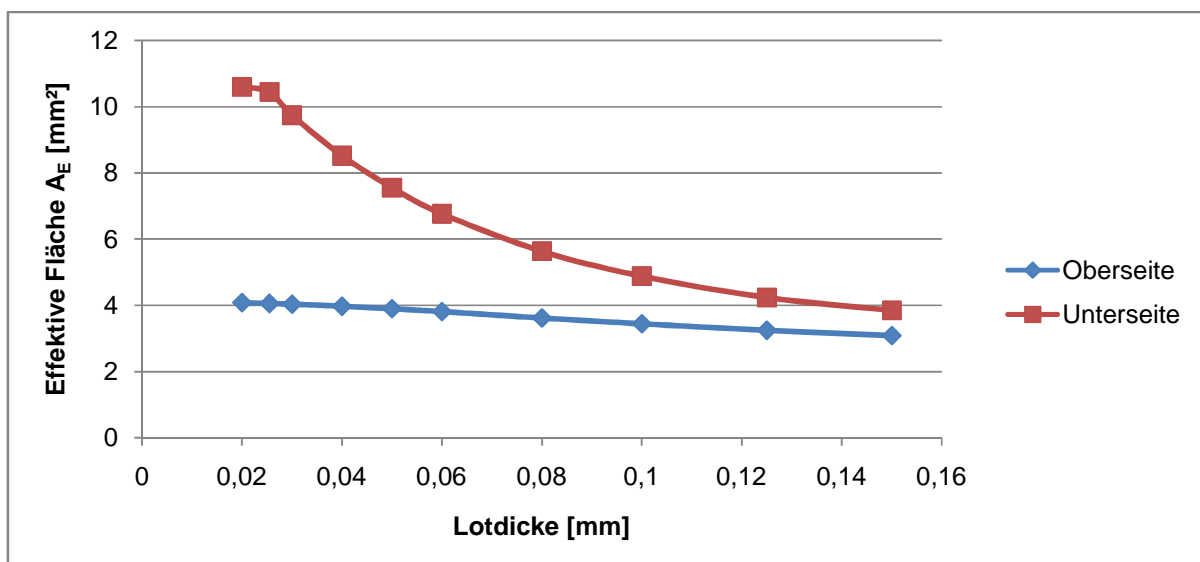


Abbildung 90: Effektive Fläche über der Lotdicke



## 8.6 Versatz der Solarzellenverbinder

Beim Fertigungsprozess des Lötens im Tabber-Stringers, oder per Hand kann es vorkommen, dass die Solarzellenverbinder nicht exakt auf der Mitte der Busbars positioniert werden. Da das FEM-Modell nur als ein Viertel dargestellt ist, wird der Versatz nur an den linken Busbars untersucht. Unterschieden werden hierbei vier verschiedene Fehlerarten:

- Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Oberseite)
- Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Unterseite)
- Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (selbe Richtung)
- Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (unterschiedliche Richtung)

Untersucht wird, wie sich die unterschiedlichen Konfigurationen auf die maximalen Hauptspannungen und auf die Bruchwahrscheinlichkeit auswirken. Die untersuchten Pfade verlaufen diesmal quer zu den Busbars, damit die lokale Überhöhung der Spannung erkannt wird, wie die Abbildung 91 zeigt:

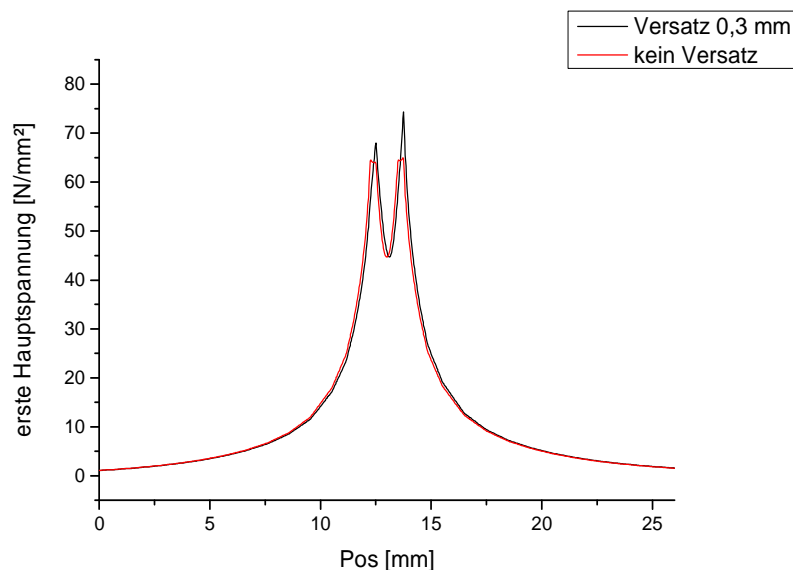


Abbildung 91: Vergleich Y90 ohne und mit Versatz

Wie gut in dem Bild zu erkennen ist verlagert sich die maximale erste Hauptspannung nach rechts, wenn der Solarzellenverbinder in derselben Richtung einen Versatz aufweist. Die Pfade längs zu den Busbars würden diese Veränderung nicht reflektieren.

## Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Oberseite)

In dieser Parameterstudie wird der obere Solarzellenverbinder nach rechts um bis zu  $0,5\text{ mm}$  verschoben. Es handelt sich dabei um die größte Verschiebung in den Parameterstudien. Abbildung 92 zeigt beispielhaft die Verschiebung um  $0,3\text{ mm}$  im FEM-Modell.

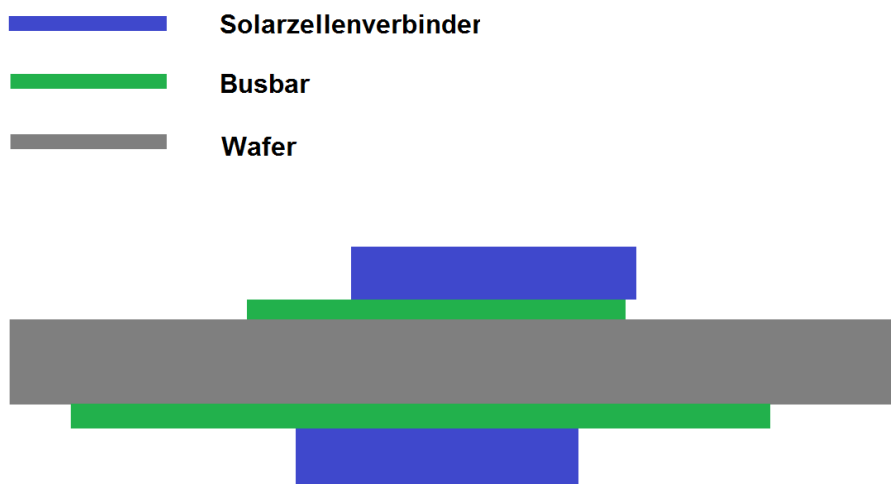


Abbildung 92: Versatz des oberen Solarzellenverbinders nach rechts um  $0,3\text{ mm}$

## Pfad Y90

Zunächst steigt in Abbildung 93 die maximale erste Hauptspannung bis zu einem Versatz von  $0,2\text{ mm}$  an und sinkt nach diesem lokalen Maximum stetig ab. Bei einer Verschiebung von  $0,5\text{ mm}$  ist die maximale erste Hauptspannung sogar unter dem Wert, der bei keiner Verschiebung erreicht wird. Die maximale zweite Hauptspannung steigt bis zu einer Verschiebung von  $0,1\text{ mm}$ , sinkt danach wieder bis zu dem lokalen Minimum bei  $0,3\text{ mm}$  und steigt bis zum Ende der Parameterstudie wieder.

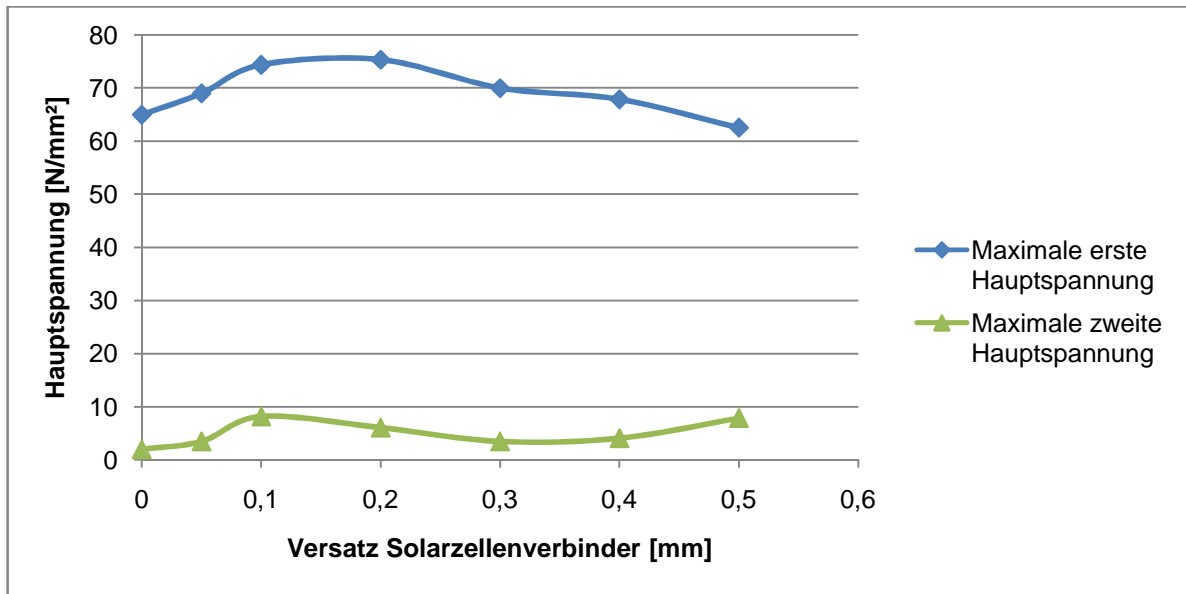


Abbildung 93: S1 und S2 des Pfades Y90 "Versatz oben"

### Pfad Y15U

Auf der Unterseite des Wafers wirkt sich der Versatz des oberen Solarzellenverbinders weniger auf die maximale erste Hauptspannung aus (Abbildung 94). Zwar steigt sie bis zu einem Versatz von 0,1 mm, doch bleibt sie danach annähernd konstant. Im Gegensatz dazu sinkt die maximale zweite Hauptspannung stetig bei wachsendem Versatz.

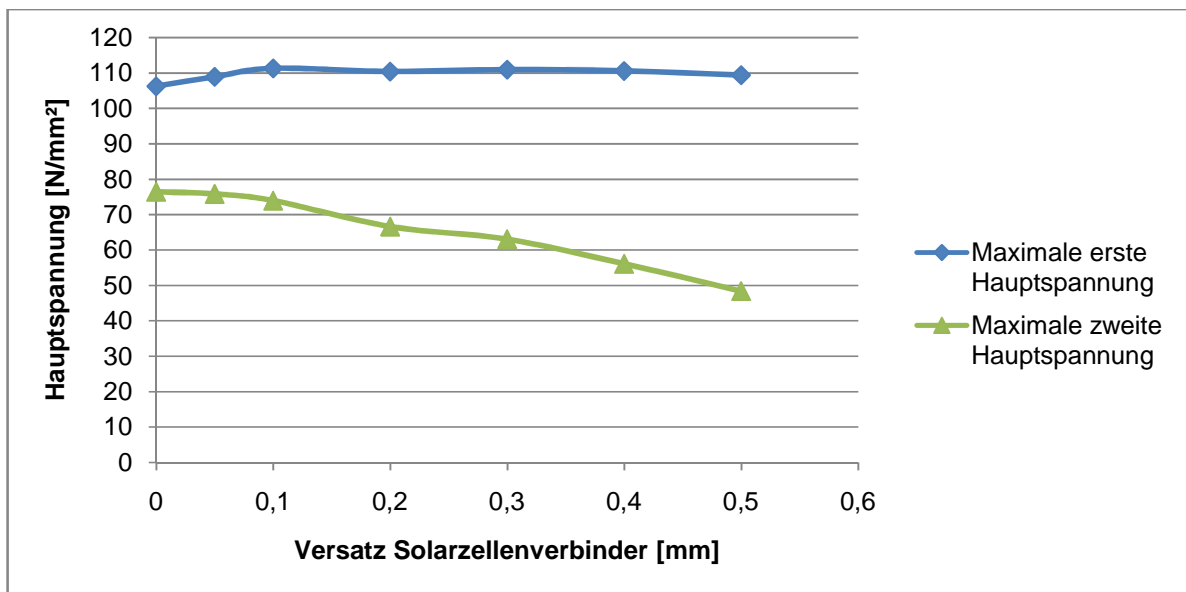


Abbildung 94: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz oben"

## Bruchwahrscheinlichkeit

Die Bruchwahrscheinlichkeit bleibt bis zu einem Versatz von  $0,1\text{ mm}$  in etwa gleich und sinkt danach bis zu einem Versatz von  $0,3\text{ mm}$  und steigt dann bis zum Ende wieder an, wie in Abbildung 95 zu sehen ist.

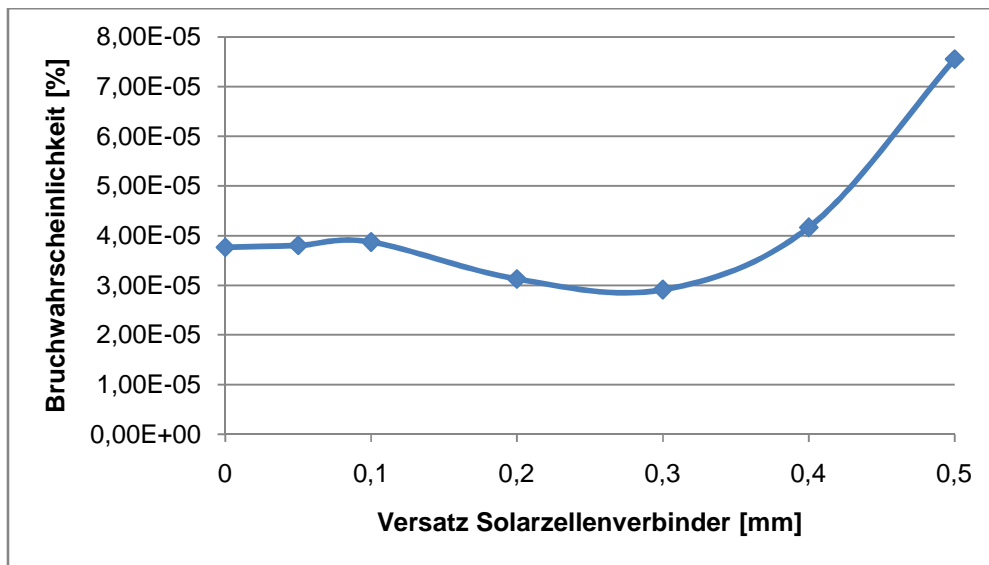


Abbildung 95: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz oben"

## Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Unterseite)

In dieser Parameterstudie wird der untere Solarzellenverbinder bis zu maximal  $0,3\text{ mm}$  nach rechts verschoben.

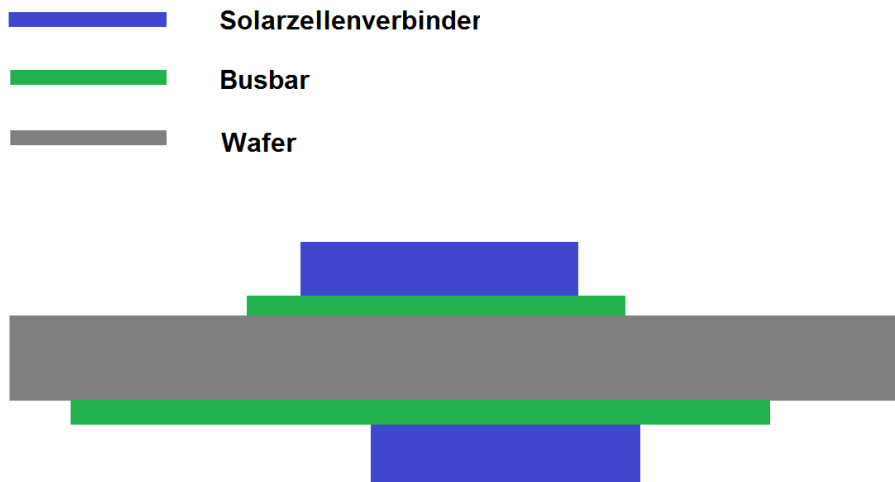


Abbildung 96: Versatz des unteren Solarzellenverbinders nach rechts um 0,3 mm

### Pfad Y90

Auf der Oberseite des Wafers (Abbildung 97) finden keine erkennbaren Veränderungen der maximalen Hauptspannungen statt.

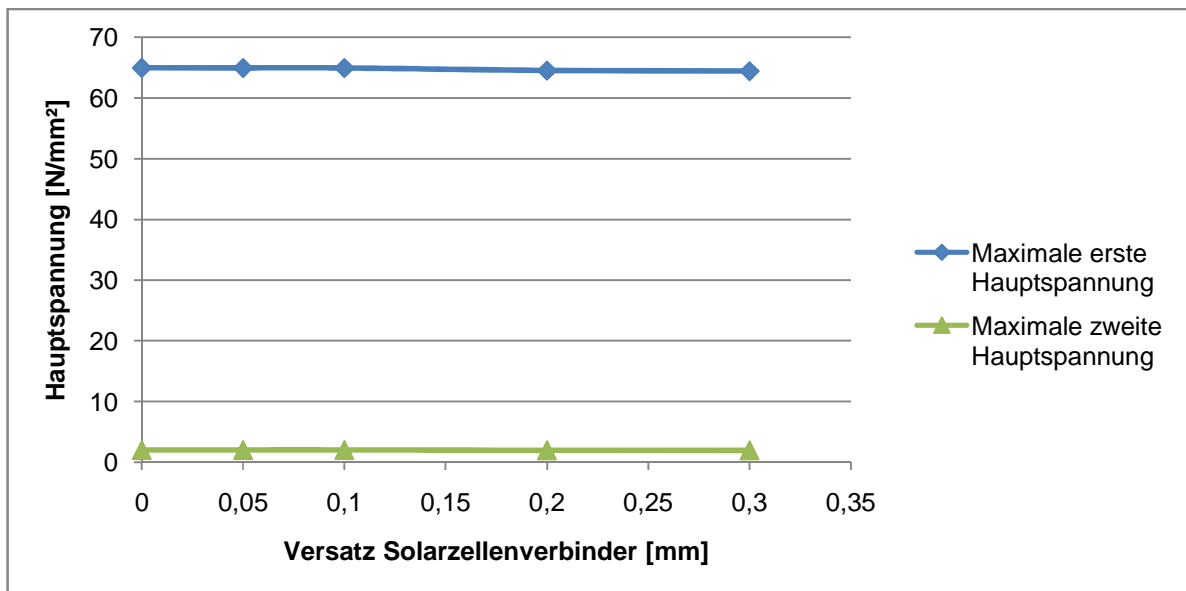


Abbildung 97: S1 und S2 des Pfades Y90 "Versatz unten"

## Pfad Y15U

Auf der Unterseite des Wafers ist dagegen ein deutlicher linearer Anstieg der maximalen ersten Hauptspannung zu erkennen (Abbildung 98). Ein lokales Maximum tritt hingegen nicht auf.

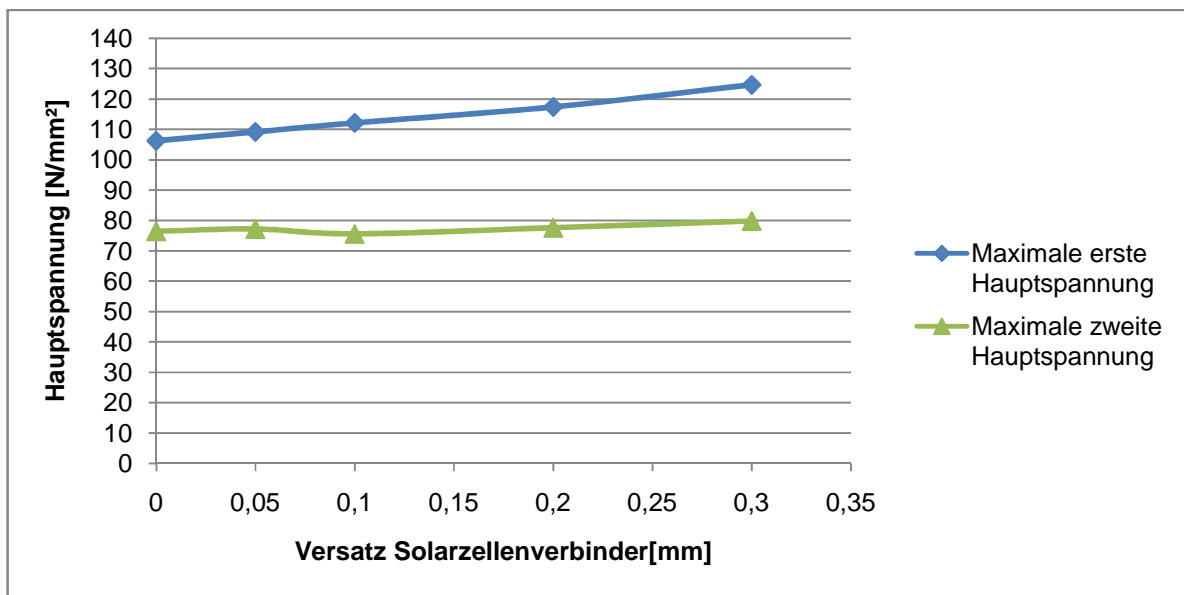


Abbildung 98: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz unten"

## Bruchwahrscheinlichkeit

Beim Versatz des unteren Solarzellenverbinders steigt die Bruchwahrscheinlichkeit mit steigendem Versatz an, was in der Abbildung 99 zu sehen ist.

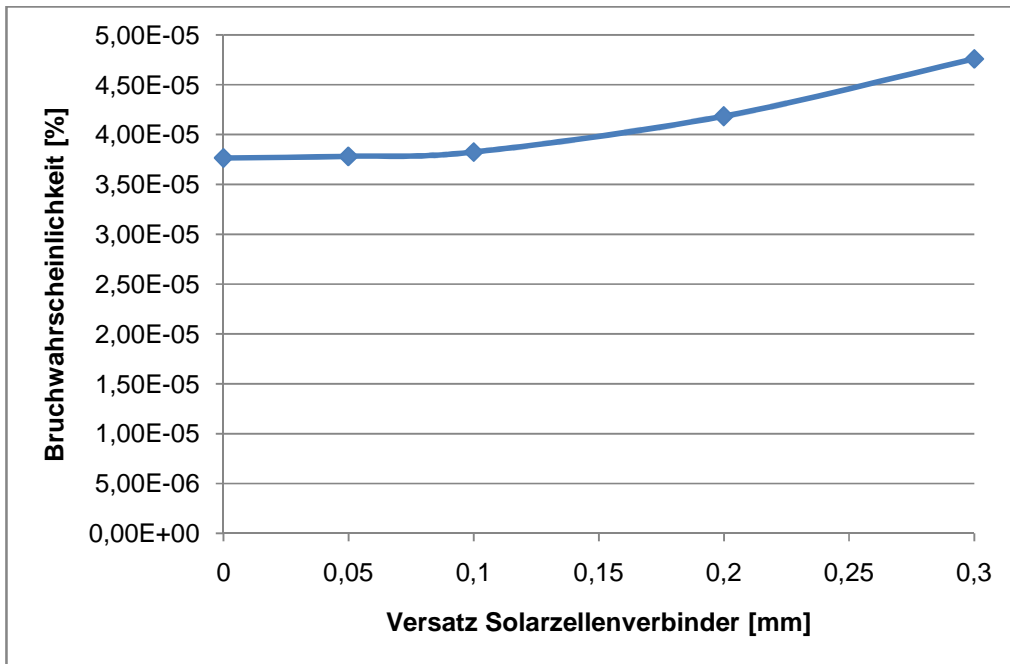


Abbildung 99: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz unten"

### Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (selbe Richtung)

Diese Parameterstudie untersucht, die Auswirkungen auf den Wafer, wenn beide Solarzellenverbinder einen Versatz in dieselbe Richtung (Abbildung 100) aufweisen. Auch hier wurde der maximale Versatz mit 0,3 mm festgelegt.

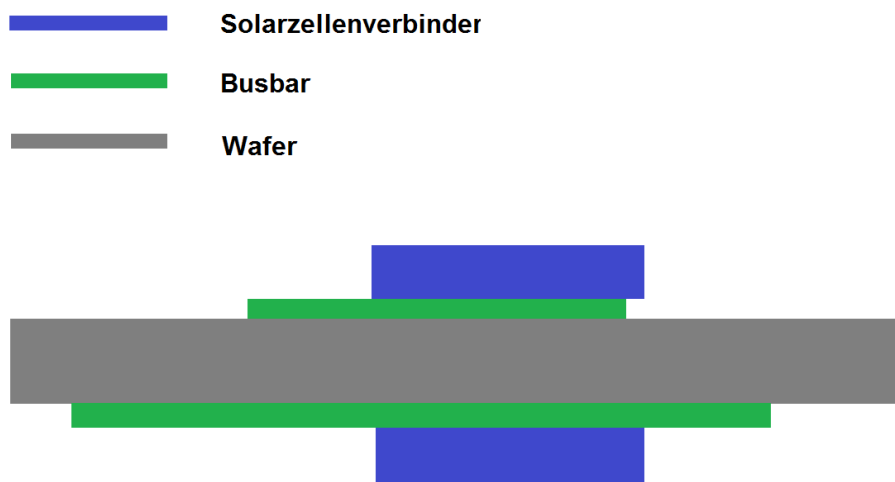


Abbildung 100: Versatz beider Solarzellenverbinder nach rechts um 0,3 mm

## Pfad Y90

Auf der Oberseite des Wafers steigt zunächst die maximale erste Hauptspannung bis zu einer Verschiebung von  $0,2\text{ mm}$  an (Abbildung 101). Dabei bildet sich ein Bereich von  $0,1\text{ mm}$  bis  $0,2\text{ mm}$  des Versatzes heraus, bei dem, die Spannung annähernd konstant bleibt. Bei  $0,3\text{ mm}$  Versatz sinkt die maximale erste Hauptspannung wieder. Bei der maximalen zweiten Hauptspannung bildet sich ein Maximum bei einem Versatz von  $0,1\text{ mm}$  aus.

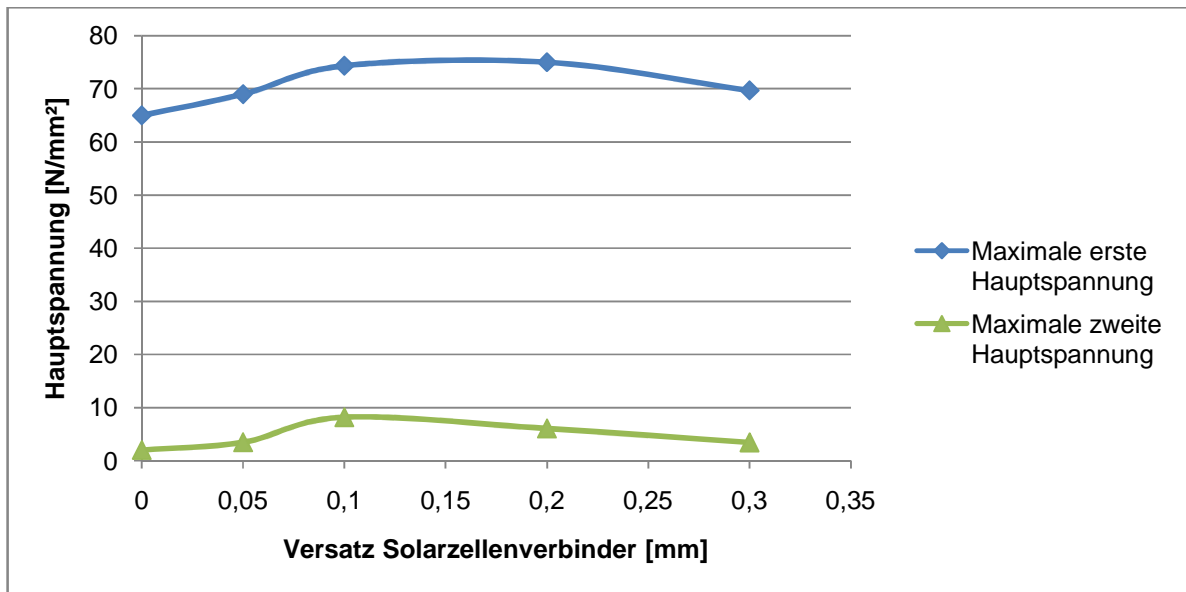


Abbildung 101: S1 und S2 des Pfades Y90 "Versatz selbe Richtung"

## Pfad Y15U

Die Unterseite hingegen weist nur geringe Unterschiede in den maximalen Hauptspannungen bei dieser Parameterstudie auf (Abbildung 102).



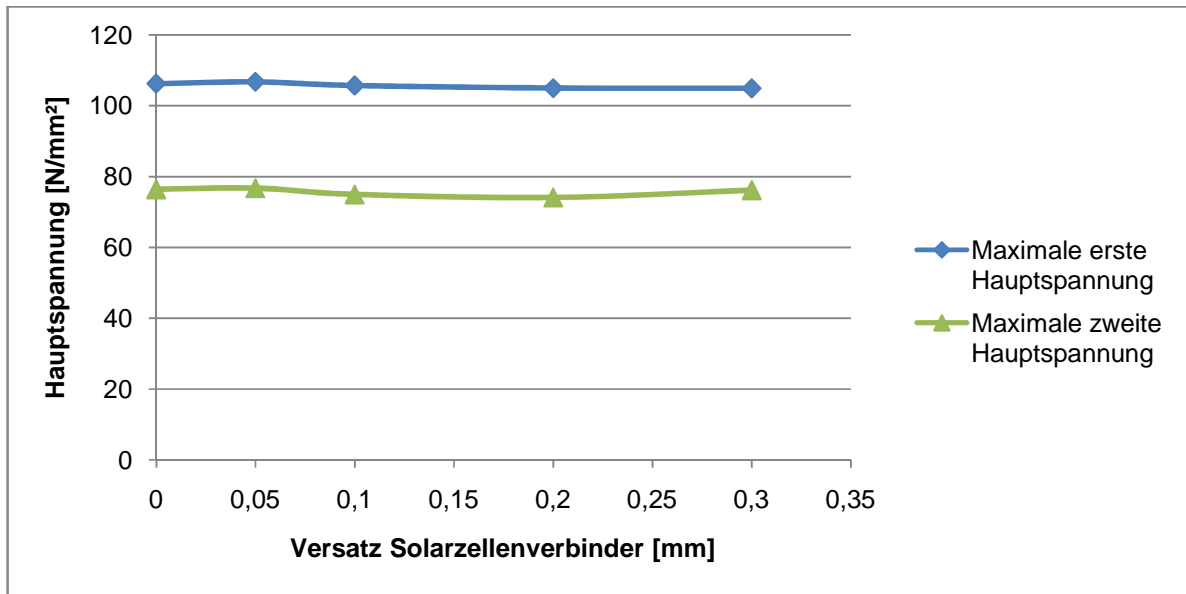


Abbildung 102: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz selbe Richtung"

### Bruchwahrscheinlichkeit

Wenn der Versatz beider Solarzellenverbinder in der gleichen Richtung liegt, fällt die Bruchwahrscheinlichkeit nach einem Maximum bei 0,1 mm Versatz stark ab (Abbildung 103).

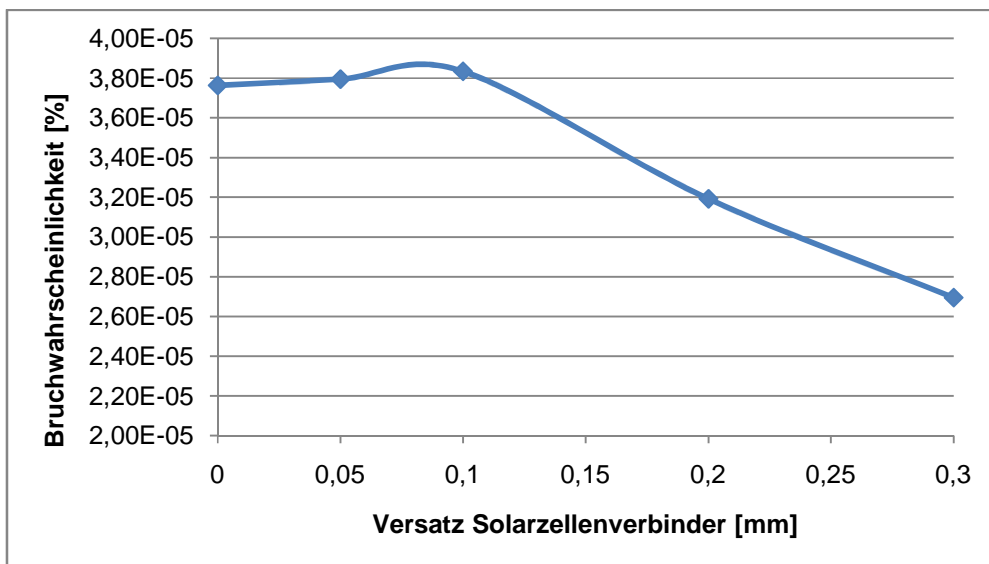


Abbildung 103: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz selbe Richtung"

### Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (unterschiedliche Richtung)

In dieser Parameterstudie wird der obere Solarzellenverbinder nach rechts verschoben und der untere im gleichen Maß nach links bis zu einem maximalen Versatz von 0,3 mm, was in der Abbildung 104 dargestellt ist.

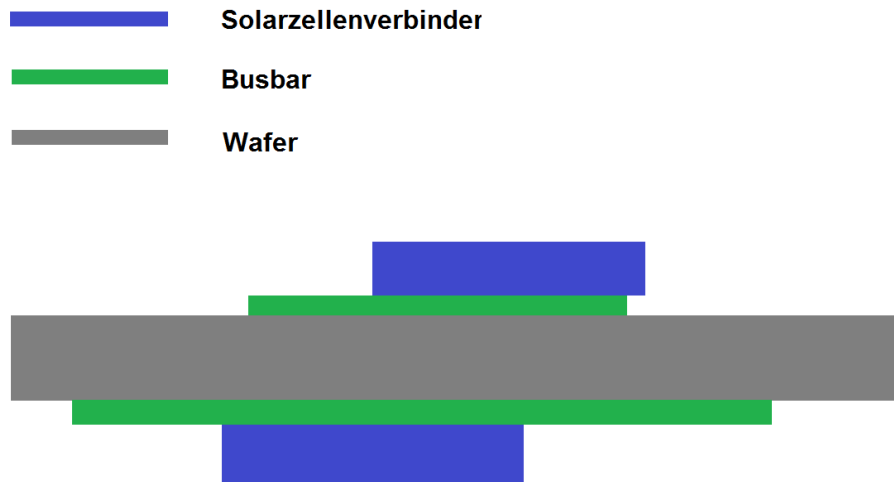


Abbildung 104: gegenseitiger Versatz der Solarzellenverbinder um 0,3 mm

## Pfad Y90

Bei entgegengesetzter Verschiebung der Solarzellenverbinder bildet sich auf der Oberseite des Wafers ein ähnlicher Verlauf der maximalen Hauptspannungen aus wie beim Versatz in dieselbe Richtung (Abbildung 105). Die maximale erste Hauptspannung steigt bis zu einem Wert für den Versatz von  $0,2\text{ mm}$  wobei sie ein Plateau zwischen  $0,1\text{ mm}$  und  $0,2\text{ mm}$  Versatz bildet. Danach wird die maximale erste Hauptspannung wieder kleiner. Ein lokales Maximum bei  $0,1\text{ mm}$  Versatz bildet sich wieder bei der maximalen zweiten Hauptspannung aus.

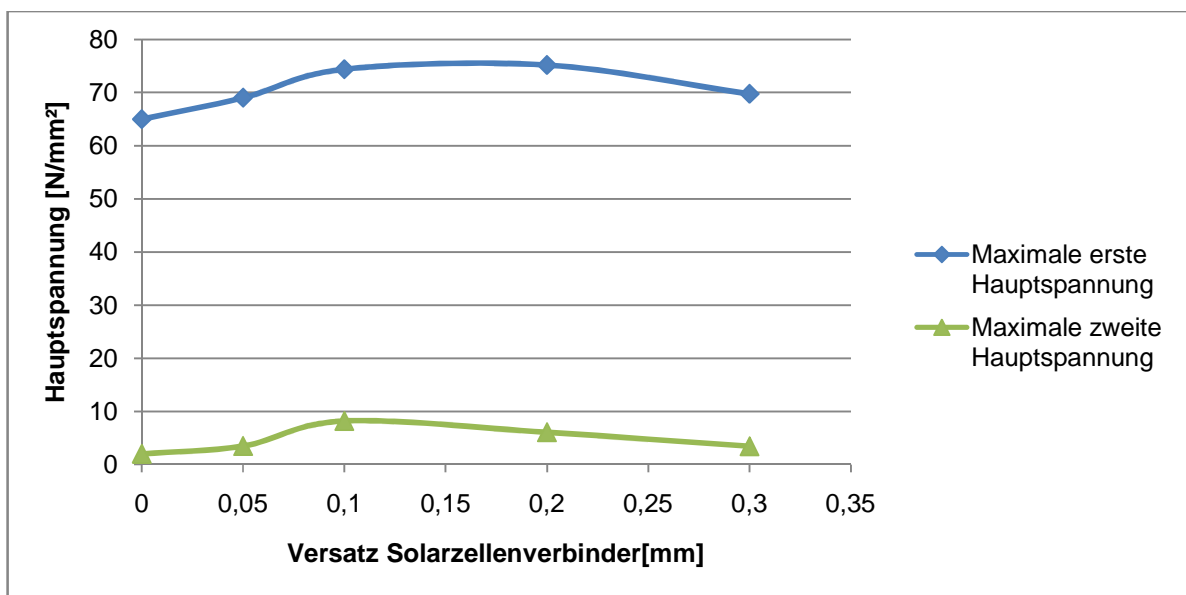


Abbildung 105: S1 und S2 des Pfades Y90 "Versatz entgegengesetzte Richtung"

## Pfad Y15U

Bei der entgegengesetzten Verschiebung der Solarzellenverbinder steigt die maximale erste Hauptspannung bei größer werdendem Versatz stetig an. Die maximale zweite Hauptspannung wird hingegen kleiner bei größerem Versatz (Abbildung 106).

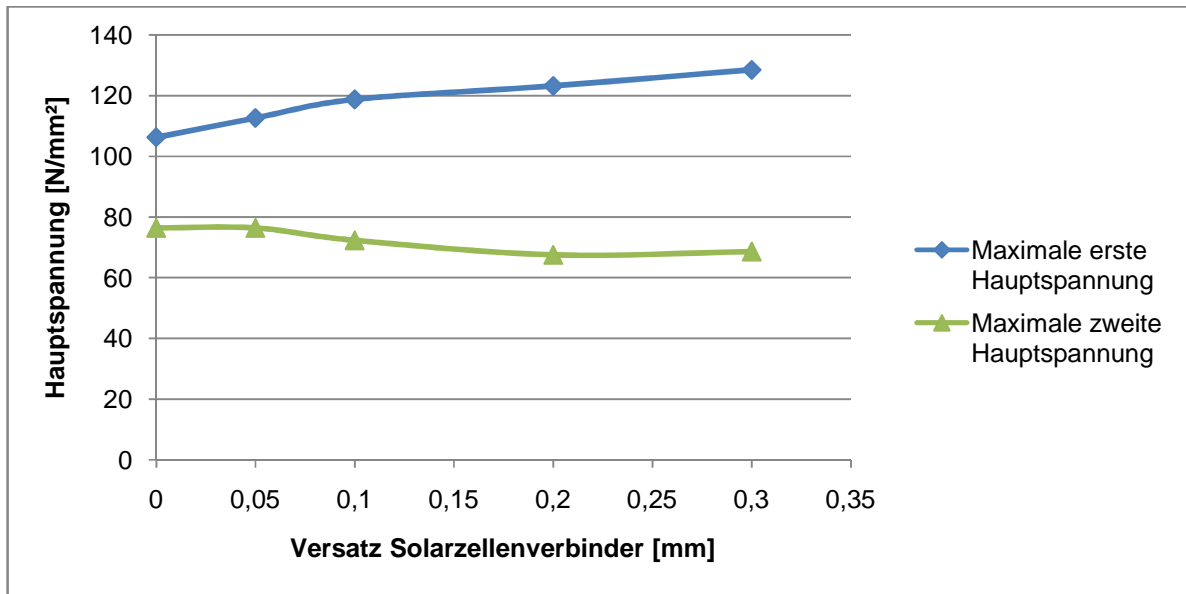


Abbildung 106: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz entgegengesetzte Richtung"

### Bruchwahrscheinlichkeit

Wenn sich die Solarzellenverbinder entgegengesetzt verschieben, bleibt die Bruchwahrscheinlichkeit bis zu einem Versatz von 0,2 mm in etwa gleich und steigt bei größer werdenden Versatz stark an, was die Abbildung 107 zeigt.

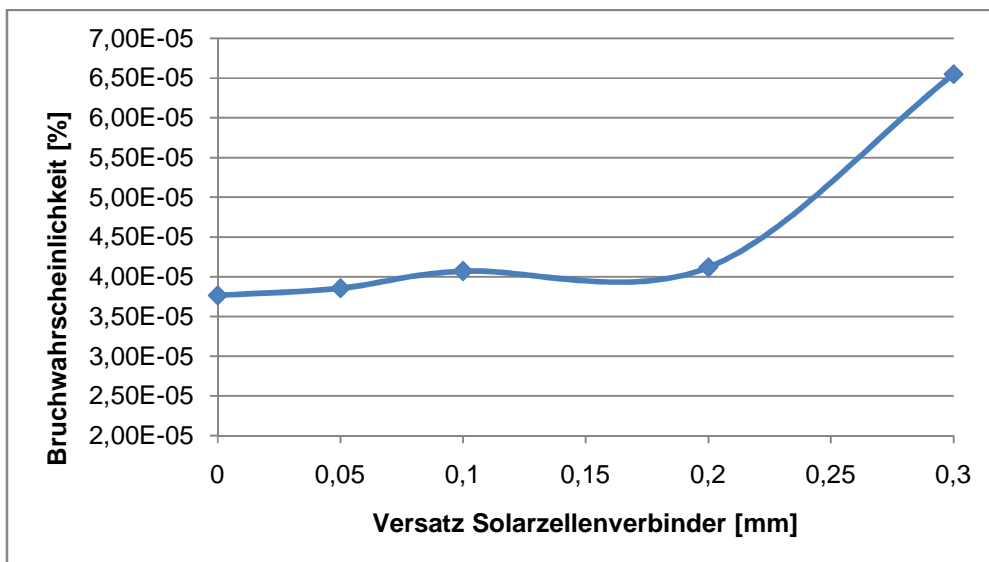


Abbildung 107: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz entgegengesetzte Richtung"

**Erklärung für das Plateau der maximalen ersten Hauptspannung bei einer Verschiebung von 0,1 mm bis 0,2 mm und die lokalen Maximalwerte der zweiten Hauptspannung auf der Oberseite des Wafers beim Versatz des oberen Solarzellenverbinders:**

Da in diesen Parameterstudien die Solarzellenverbinder 1,3 mm breit und die Busbars der Oberseite 1,5 mm breit sind, liegt ein Kantenpaar von Solarzellenverbinder und Busbar bei der Verschiebung des oberen Solarzellenverbinders um 0,1 mm übereinander. Auch hier ergibt sich dadurch wieder eine erhöhte Kerbwirkung die zu einer Spannungserhöhung führt. Auf der Unterseite des Wafers ist dieses Phänomen nicht zu beobachten. Der Grund dafür liegt darin, dass der untere Busbar 3 mm breit ist und damit die seitlichen Kanten von Busbar und Solarzellenverbinder in diesen Parameterstudien nicht übereinander liegen.

**Ergebnisse der Parameterstudie „Versatz der Solarzellenverbinder“:**

- Lokale Maxima der zweiten Hauptspannungen auf der Oberseite des Wafers, wenn die Kanten von Solarzellenverbinder und Busbar übereinander stehen
- Der Versatz eines Solarzellenverbinders hat kaum Einfluss auf die maximale erste Hauptspannung auf der gegenüberliegenden Seite des Wafers

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es, ein funktionierendes FEM-Modell für den Lötprozess, der bei Solarzellen durchgeführt wird, zu erstellen. Die wichtigen Teilaspekte wurden dabei für dieses komplexe Modell aufgezeigt. Dazu gehören die Recherche über die benötigten Stoffdaten, die geometrischen Abmaße einzelner Teile, die Wahl der Elemente und das Zusammenspiel dieser unter Berücksichtigung der aufgegebenen Randbedingungen.

Auf der Basis dieses Modells können die Auswirkungen einzelner Parameter nachvollzogen werden. Die untersuchten Parameter waren dabei die Breite des Solarzellenverbinders, die Dicke des Solarzellenverbinders, der seitliche Versatz der Solarzellenverbinder, die Dicke des Lotes und der Temperaturverlauf. Für die Auswertung der Ergebnisse wurden die erste und zweite Hauptspannung sowie die Bruchwahrscheinlichkeit herangezogen.

In den Parameterstudien "Breite Solarzellenverbinder" wurde festgestellt, dass die maximalen Hauptspannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit in erster Linie von den geometrischen Abmaßen der Solarzellenverbinder abhängen. Je größer die Querschnittfläche des Kupferkerns im Solarzellenverbinder ist, desto größer sind auch die maximalen Hauptspannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit des Wafers. Die maximale zweite Hauptspannung ist dabei nur von der Dicke des Kupferkerns (und nicht von der Breite) abhängig.

Auch wenn die Werte für die Hauptspannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit in den Parameterstudien "Temperaturverlauf" und "Lotdicke" nicht korrelierten, konnte erklärt werden, dass der Wert der effektiven Fläche  $A_E$  sich in einer Parameterstudie stark verringern kann und somit die Bruchwahrscheinlichkeit vermindert. Der Einfluss der effektiven Fläche in Verbindung mit der Bruchwahrscheinlichkeit ist damit ein nicht zu unterschätzender Faktor bei der Bewertung des Lötprozesses von Solarzellen.

Es sollten stets Solarzellenverbinder zum Einsatz kommen, bei denen der Querschnitt und die Dicke des Kupfers gering sind damit die Wafer keiner zu großen Spannung ausgesetzt sind und die Bruchwahrscheinlichkeit gering bleibt. Bei wirtschaftlicher Tragbarkeit kann auch darüber nachgedacht werden, die Dicke des Lotes zu erhöhen, um die Bruchwahrscheinlichkeit zu verringern, auch wenn dadurch die Hauptspannungen im Wafer steigen. Durch die Verlängerung der Abkühlzeit wird es ebenfalls möglich die Bruchwahrscheinlichkeit zu senken, jedoch ohne dabei höhere Spannungen in den Wafer zu induzieren.

Die Solarzellenverbinder sollten nicht die gleiche Breite haben wie die Busbars, da sich hierbei in den Parameterstudien "Breite Solarzellenverbinder" lokale Maximas der Hauptspannungen und der Bruchwahrscheinlichkeit ausgebildet haben. Besser ist es generell Solarzellenverbinder zu verwenden, die in der Breite kleiner sind als die Busbars.

Der seitliche Versatz der Solarzellenverbinder sollte in der Fertigung so gering wie möglich gehalten werden, da die Auswirkungen auf die maximalen Hauptspannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit des Wafers vor allem im Zusammenspiel der einzelnen Solarzellenverbinder nicht trivial sind.

Mit Hilfe der Ergebnisse kann die Löttaufgabe zukünftig angepasst und somit die Fehlerrate reduziert werden. Dadurch kann der Ertragsverlust im späteren Betrieb minimiert werden

Zukünftige Forschungen über Solarzellen und Solarmodule können auf den Ergebnissen aufbauend ihre Untersuchung anpassen und zielgerichteter nach bekannten oder noch unbekanntem Fehlerursachen suchen. Sie könnten darauf eingehen, wie Ribbon und Lot geformt sein müssen, um eine noch bessere Haltbarkeit der Solarzellen und -module zu gewährleisten. Zusätzlich muss erforscht werden, wie groß der Einfluss auf die inneren Spannungen und die Bruchwahrscheinlichkeit des Wafers ist, der von den unterschiedlich langen Wirkflächen der Solarzellenverbinder auf Ober- und Unterseite des Wafer ausgeht.

Der Umfang dieser Arbeit und die Vielzahl von Ergebnissen zeigen, dass ein komplexes Thema mit Hilfe der FEM in einem vorgegebenen Zeitraum sinnvoll untersucht werden kann und tiefgreifende Einblicke in die innere Wirkweise einer Baugruppe aufgezeigt werden können.

**Folgende Untersuchungen müssen in Zukunft noch erfolgen:**

- Untersuchung alternativer Lötverfahren mit Hilfe der FEM unter Berücksichtigung des Wärmeeinflussbereiches
- Herkunft der hohen Spannungen in x-Richtung unter den Busbars im Bereich  $9\text{ mm} < y < 15\text{ mm}$
- Einfluss der geometrischen Form der Solarzellenverbinder und alternativer Layouts auf die Bruchwahrscheinlichkeit

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technische Zeichnung der Solarzelle [1].....	- 3 -
Abbildung 2: Funktionsweise einer Solarzelle [5].....	- 4 -
Abbildung 3: Grafische Darstellung der kinematischen Verfestigung [12].....	- 8 -
Abbildung 4: Grafische Darstellung der isotropen Verfestigung [13].....	- 9 -
Abbildung 5: Vergleich Solarzelle ohne Textur und mit Textur .....	- 10 -
Abbildung 6: Anwendungsbereiche der Vergleichsspannungshypothesen [29] .....	- 17 -
Abbildung 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines duktilen Werkstoffes [30].....	- 18 -
Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines duktilen Werkstoffes ohne ausgeprägte Hooke'sche Gerade [31].....	- 19 -
Abbildung 9: Vergleich von duktilen und spröden Werkstoffen [33] .....	- 19 -
Abbildung 10: Normalverteilungsdichte [34].....	- 22 -
Abbildung 11: Lognormalverteilungsdichte [34] .....	- 23 -
Abbildung 12: Weibull-Verteilungsdichte [34].....	- 24 -
Abbildung 13: Gammaverteilungsdichte [34].....	- 25 -
Abbildung 14: Position und Ausrichtung der Risse in Solarzellen [24] .....	- 34 -
Abbildung 15: Automatisiertes Kolbenlöten [43].....	- 42 -
Abbildung 16: Lotbad für das Lotbadtauchlöten [44] .....	- 43 -
Abbildung 17: Wellenlöten [45].....	- 43 -
Abbildung 18: Flammlöten beim Messinglöten [47].....	- 45 -
Abbildung 19: Heizplatte zum Löten [51] .....	- 46 -
Abbildung 20: Laserstrahllöten [55] .....	- 48 -
Abbildung 21: Induktionslöten beim selektiven Einzelpunktlöten [56] .....	- 49 -
Abbildung 22: Förderband mit aufgelegten Solarzellen .....	- 51 -
Abbildung 23: Solarzelle durch Niederhalter fixiert im Ofen.....	- 52 -
Abbildung 24: Infrarotofen beim Tabber-Stringer Prozess.....	- 52 -
Abbildung 25: Aufteilung der Grundflächen des FEM-Modells der Solarzelle .....	- 53 -
Abbildung 26: Vernetztes und extrudiertes Modell der Solarzelle .....	- 54 -
Abbildung 27: 20-Knoten Strukturelement [58] .....	- 58 -
Abbildung 28: Solarzellenverbinder mit Abstand zur Solarzelle.....	- 59 -
Abbildung 29: Quelltext für die Definition eines Kontaktpaars .....	- 60 -
Abbildung 30: Kontaktpaar des linken oberen Busbars mit Abstand zu Visualisierung .....	- 60 -
Abbildung 31: erste Flächenunterteilung der Niederhalter.....	- 62 -
Abbildung 32: Grobes ungeordnetes Netz der Niederhalter .....	- 62 -
Abbildung 33: Neue Strukturierung der Flächen des Niederhalters .....	- 62 -
Abbildung 34: Endgültiges Netz der Niederhalter.....	- 62 -
Abbildung 35: Kunststoffauflager .....	- 64 -
Abbildung 36: Gemessener Temperaturverlauf beim Löten .....	- 65 -
Abbildung 37: Modellierte Abkühlkurve.....	- 66 -
Abbildung 38: Zusammenspiel der einzelnen Bauteile bei der Temperaturfeldberechnung .....	- 67 -
Abbildung 39: Temperaturverteilung bei 150 °C Konvektionstemperatur .....	- 67 -
Abbildung 40: Temperaturverteilung bei 125 °C Konvektionstemperatur .....	- 68 -
Abbildung 41: Temperaturverteilung bei 100 °C Konvektionstemperatur .....	- 68 -
Abbildung 42: Temperaturverteilung bei 75 °C Konvektionstemperatur .....	- 69 -
Abbildung 43: Temperaturverteilung bei 20 °C Konvektionstemperatur.....	- 69 -
Abbildung 44: Temperaturverteilung des Lotes am Ende der Abkühlung durch Konvektion.....	- 70 -
Abbildung 45: Konturplot der ersten Hauptspannung der Solarzelle.....	- 71 -
Abbildung 46: Konturplot der ersten Hauptspannung der Oberseite des Wafers .....	- 72 -
Abbildung 47: Konturplot der ersten Hauptspannung der Oberseite des Wafers in der Nahansicht .....	- 72 -
Abbildung 48: Konturplot der ersten Hauptspannung der Unterseite des Wafers.....	- 73 -
Abbildung 49: Konturplot der ersten Hauptspannung der Unterseite des Wafers in der Nahansicht.....	- 73 -



---

Abbildung 50: Konturplot der ersten Hauptspannung mit den eingezeichneten Pfaden für die Auswertung	- 74 -
Abbildung 51: Hauptspannungen X26O.....	- 75 -
Abbildung 52: Spannungen in den Raumkoordinaten X26O .....	- 76 -
Abbildung 53: Hauptspannungen X26U.....	- 79 -
Abbildung 54: Spannungen in den Raumkoordinaten X26U.....	- 79 -
Abbildung 55: Verformter Schnitt der Solarzelle.....	- 80 -
Abbildung 56: Skizze der wirkenden Kräfte.....	- 81 -
Abbildung 57: Vektorplot der ersten Hauptspannung des Wafers .....	- 81 -
Abbildung 58: Hauptspannungen Y9O .....	- 83 -
Abbildung 59: Spannungen in den Raumkoordinaten Y9O .....	- 83 -
Abbildung 60: Hauptspannungen Y9U.....	- 84 -
Abbildung 61: Spannungen in den Raumkoordinaten Y9U .....	- 85 -
Abbildung 62: Hauptspannungen Y15U.....	- 86 -
Abbildung 63: Spannungen in den Raumkoordinaten Y15U.....	- 86 -
Abbildung 64: Hauptspannungen Y15U.....	- 87 -
Abbildung 65: Spannungen in den Raumkoordinaten Y15O .....	- 88 -
Abbildung 66: S1 und S2 des Pfades X26O .....	- 91 -
Abbildung 67: S1 und S2 des Pfades X26U.....	- 92 -
Abbildung 68: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders.....	- 93 -
Abbildung 69: S1 und S2 des Pfades X26O .....	- 94 -
Abbildung 70: S1 und S2 des Pfades X26U.....	- 95 -
Abbildung 71: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders.....	- 95 -
Abbildung 72: S1 und S2 des Pfades X26O .....	- 96 -
Abbildung 73: S1 und S2 des Pfades X26U.....	- 97 -
Abbildung 74: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders.....	- 97 -
Abbildung 75: S1 und S2 des Pfades X26O .....	- 98 -
Abbildung 76: S1 und S2 des Pfades X26U.....	- 99 -
Abbildung 77: Bruchwahrscheinlichkeit In Abhängigkeit der Breite des Solarzellenverbinders.....	- 100 -
Abbildung 78: S1 und S2 des Pfades X26O im Vergleich "Breite Solarzellenverbinder" .....	- 101 -
Abbildung 79: S1 und S2 des Pfades X26U im Vergleich "Breite Solarzellenverbinder" .....	- 101 -
Abbildung 80: Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Dicke des Kupfers.....	- 102 -
Abbildung 81: Skizze Kerben .....	- 103 -
Abbildung 82: Skizze Verformung .....	- 103 -
Abbildung 83: S1 und S2 des Pfades X26O über der Abkühlzeit .....	- 105 -
Abbildung 84: S1 und S2 des Pfades X26U über der Abkühlzeit.....	- 105 -
Abbildung 85: Bruchwahrscheinlichkeit über der Abkühlzeit.....	- 106 -
Abbildung 86: Effektive Fläche über der Abkühlzeit .....	- 107 -
Abbildung 87: S1 und S2 des Pfades X26O "Lotdicke" .....	- 108 -
Abbildung 88: S1 und S2 des Pfades X26U "Lotdicke" .....	- 109 -
Abbildung 89: Bruchwahrscheinlichkeit über der Lotdicke.....	- 110 -
Abbildung 90: Effektive Fläche über der Lotdicke .....	- 110 -
Abbildung 91: Vergleich Y9O ohne und mit Versatz.....	- 111 -
Abbildung 92: Versatz des oberen Solarzellenverbinders nach rechts um 0,3 mm .....	- 112 -
Abbildung 93: S1 und S2 des Pfades Y9O "Versatz oben" .....	- 113 -
Abbildung 94: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz oben".....	- 113 -
Abbildung 95: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz oben".....	- 114 -
Abbildung 96: Versatz des unteren Solarzellenverbinders nach rechts um 0,3 mm .....	- 115 -
Abbildung 97: S1 und S2 des Pfades Y9O "Versatz unten" .....	- 115 -
Abbildung 98: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz unten".....	- 116 -
Abbildung 99: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz unten".....	- 117 -
Abbildung 100: Versatz beider Solarzellenverbinder nach rechts um 0,3 mm.....	- 117 -
Abbildung 101: S1 und S2 des Pfades Y9O "Versatz selbe Richtung" .....	- 118 -
Abbildung 102: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz selbe Richtung" .....	- 119 -
Abbildung 103: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz selbe Richtung" .....	- 119 -

---

Abbildung 104: gegenseitiger Versatz der Solarzellenverbinder um 0,3 mm .....	- 120 -
Abbildung 105: S1 und S2 des Pfades Y9O "Versatz entgegengesetzte Richtung" .....	- 121 -
Abbildung 106: S1 und S2 des Pfades Y15U "Versatz entgegengesetzte Richtung" .....	- 122 -
Abbildung 107: Bruchwahrscheinlichkeit "Versatz entgegengesetzte Richtung" .....	- 122 -
Abbildung 108: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 137 -
Abbildung 109: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 138 -
Abbildung 110: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 139 -
Abbildung 111: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 139 -
Abbildung 112: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 140 -
Abbildung 113: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 140 -
Abbildung 114: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 141 -
Abbildung 115: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 141 -
Abbildung 116: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 142 -
Abbildung 117: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 142 -
Abbildung 118: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O.....	- 143 -
Abbildung 119: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U.....	- 143 -
Abbildung 120: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y9O .....	- 144 -
Abbildung 121: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y15O.....	- 144 -
Abbildung 122: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y9O .....	- 145 -
Abbildung 123: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y15O.....	- 145 -
Abbildung 124: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y9O .....	- 146 -
Abbildung 125: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y15O.....	- 146 -
Abbildung 126: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y9O .....	- 147 -
Abbildung 127: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y15O.....	- 147 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stoffdaten der Solarzelle.....	- 56 -
Tabelle 2: Tabellarischer Temperaturverlauf des Lötprozesses .....	- 65 -
Tabelle 3: Ausgewertete Spannungen der Pfade.....	- 89 -
Tabelle 4: Werte für die Berechnung der Bruchwahrscheinlichkeit.....	- 89 -
Tabelle 5: Parameter der Solarzellenverbinder .....	- 90 -
Tabelle 6: Veränderte Abkühlkurven.....	- 104 -

## Quellen

[1]	<a href="http://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Q-Cells_Q6LMX3_Datenblatt.pdf">http://www.q-cells.com/uploads/tx_abdownloads/files/Q-Cells_Q6LMX3_Datenblatt.pdf</a> 12.09.2013 15:14
[2]	<a href="http://www.esb-europe.de/de/templates/pv_definition.htm">http://www.esb-europe.de/de/templates/pv_definition.htm</a> 29.07.2013 11:33
[3]	<a href="http://www.planet-schule.de/sf/multimedia-interaktive-animationen-detail.php?projekt=solarzelle">http://www.planet-schule.de/sf/multimedia-interaktive-animationen-detail.php?projekt=solarzelle</a> & <a href="http://www.planet-schule.de/sf/php/mmewin.php?id=182">http://www.planet-schule.de/sf/php/mmewin.php?id=182</a> 29.07.2013 11:34
[4]	<a href="http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/regenerative-energieversorgung/lb/solarzelle-funktion-einer-solarzelle">http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/regenerative-energieversorgung/lb/solarzelle-funktion-einer-solarzelle</a> 29.07.2013 11:35
[5]	<a href="http://www.solarverein-amberg.de/images/pv_aufbau_solarzelle.jpg">http://www.solarverein-amberg.de/images/pv_aufbau_solarzelle.jpg</a>
[6]	Mechanical Behavior and Fatigue of Copper Ribbons used as Solar Cell Interconnectors Steffen Wiese, Rico Meier, Frank Kraemer Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics
[7]	Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften von Solarzellenverbindern und deren Veränderungen während des Herstellungsprozesses - Bachelorarbeit Patrick Singer 2011 11.01.
[8]	Thermal properties of glass frit and effects on Si solar cells Yaping Zhang, Yunxia Yang, Jianhua Zheng, Wei Hua, Guorong Chen Key Laboratory for Ultrafine Materials of Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology Ausgabe: 14.09.2008

	<a href="http://www.docin.com/p-378961925.html">http://www.docin.com/p-378961925.html</a> 25.07.2013 08:39
[9]	INVESTIGATION OF THE ALLOYING PROCESS OF SCREEN PRINTED ALUMINIUM PASTES FOR THE BSF FORMATION ON SILICON SOLAR CELLS F. Huster Ausgabe: 10.06.2005 University of Konstanz, Department of Physics, 78457 Konstanz, Germany
[10]	ALUMINUM PASTES FOR THIN WAFERS S. Kim <sup>1</sup> , A. Shaikh <sup>1*</sup> , S. Sridharan <sup>2</sup> , C. Khadilkar <sup>2</sup> , * T. Pham <sup>1</sup> , 1. Ferro Corporation, Electronic Materials System, 1395 Aspen Way, Vista, CA 92083, USA June 7-11, 2004, Paris, France
[11]	<a href="http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Verfestigung">http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Verfestigung</a> 05.08.2013 14:57
[12]	<a href="http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Datei:Verfestigung-1.jpg">http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Datei:Verfestigung-1.jpg</a> 05.08.2013 15:07
[13]	<a href="http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Datei:Verfestigung-2.jpg">http://www.esocaet.com/wikiplus/index.php/Datei:Verfestigung-2.jpg</a> 06.08.2013 11:11
[14]	<a href="http://100-online.ipe.uni-stuttgart.de/BdMM1/itext_lm3_04.htm">http://100-online.ipe.uni-stuttgart.de/BdMM1/itext_lm3_04.htm</a> 24.07.2013 15:07
[15]	<a href="http://www.euroquarz.de/herstellung_von_silizium.html">http://www.euroquarz.de/herstellung_von_silizium.html</a> 28.07.2013 09:47
[16]	Herstellung von kristallinen Siliziumsolarzellen Dr.-Ing. Stephan Schönfelder Fraunhofer CSP Präsentation

[17]	<p>SOLDERING INDUCED DAMAGE TO THIN SI SOLAR CELLS AND DETECTION OF CRACKED CELLS IN MODULES</p> <p>Andrew M. Gabor, Mike Ralli, Shaun Montminy, Luis Alegria, Chris Bordonaro, Joe Woods, Larry Felton</p> <p>Evergreen Solar, Inc.</p>
[18]	<p>Constitutive Behaviour of Lead-free Solders vs. Lead-containing Solders - Experiments on Bulk Specimens and Flip-Chip Joints</p> <p>S. Wiese (1), A. Schubert (2), H. Walter (2), R. Dudek (2), F. Feustel (1), E. Meusel (1), B. Michel (2)</p> <p>(1) Dresden University of Technology, Semiconductor &amp; Microsystems Technology Laboratory TU Dresden, IHM, D-01062 Dresden, Germany</p> <p>(2) Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration, Berlin, Germany Gustav-Meyer-Allee 25, D-13355 Berlin, Germany</p>
[19]	<p>Characterisation of constitutive behaviour of SnAg, SnAgCu and SnPb solder in flip chip joints</p> <p>S. Wiese, F. Feustel, E. Meusel</p> <p>Technische Universität Dresden, Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, 01062 Dresden, Germany</p> <p>Sensors and Actuators A 99 (2002) 188-193</p>
[20]	<p>Time-independent elastic-plastic behavior of solder materials</p> <p>S. Wiese, S. Rzepka</p> <p>Electronic Packaging Laboratory, Dresden University of Technology, 01062 Dresden, Germany</p> <p>b Infineon Technologies Dresden, Königsbrücker Str. 180, 01099 Dresden, Germany</p> <p>Ausgabe: 2003-09</p>
[21]	<p>Slow Cycle Fatigue Creep Performance of Pb-Free (LF) Solders</p> <p>Vasu Vasudevan *, Xuejun Fan**, Tao Liu ***, and Dave Young *</p> <p>Intel Corporation</p> <p>2007 Electronic Components and Technology Conference</p>

[22]	<a href="http://www.aleo-solar.de/produkte/produktion/">http://www.aleo-solar.de/produkte/produktion/</a> 29.07.2013 11:30
[23]	Mechanical and Thermo-Mechanical Assessment of Encapsulated Solar Cells by Finite-Element-Simulation Sascha Dietrich*, Matthias Pander, Martin Sander, Matthias Ebert Fraunhofer – Center for Silicon Photovoltaics, Walter-Huelse-Str. 1, 06766 Halle (Saale), Germany
[24]	THE INFLUENCE OF MICRO CRACKS IN MULTI-CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS ON THE RELIABILITY OF PV MODULES P. Grunow <sup>1</sup> , P. Clemens <sup>1</sup> , V. Hoffmann <sup>1</sup> , B. Litzemberger <sup>2</sup> , L. Podlowski <sup>2</sup> <sup>1</sup> Q-Cells AG, Guardianstr. 16, D-06766 Thalheim, Germany, phone: +49 3494 <sup>2</sup> Solon PV GmbH, Ederstr. 16, D-12059 Berlin, Germany, phone: +49 30 818 79
[25]	<a href="http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo/6749">http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo/6749</a> 28.07.2013 15:01
[26]	<a href="http://www.pirol-mainz.de/pirol/angebot/service/hauptspannung/">http://www.pirol-mainz.de/pirol/angebot/service/hauptspannung/</a> 29.07.2013 08:16
[27]	Werkstofftechnik - Herstellung, Verarbeitung, Fertigung Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, Ewald Werner 5., aktualisierte Auflage 2011
[28]	<a href="http://www.maschinenbau-fh.de/f_vergleichsspannung.html">http://www.maschinenbau-fh.de/f_vergleichsspannung.html</a> 29.07.2013 13:44
[29]	<a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spannungshypo.gif">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spannungshypo.gif</a> 28.07.2013 10:36
[30]	<a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg/300px-Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg.png">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6e/Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg/300px-Spgs-Dehnungs-Kurve_Streckgrenze.svg.png</a>
[31]	<a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Spgs-Dehnungs-Kurve_Dehtgrenze.svg">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Spgs-Dehnungs-Kurve_Dehtgrenze.svg</a>

[32]	Technische Mechanik I - Festigkeitslehre - Wintersemester 2008/09 Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck, Prof. Dr.-Ing. R. Schmidt RWTH Aachen
[33]	<a href="http://www.isovolta.de/Bilder/kunst%20grund.jpg">http://www.isovolta.de/Bilder/kunst%20grund.jpg</a>
[34]	Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik Dietmar Gross, Thomas Seelig (2011) 5., erweiterte Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg ISBN 978-3-642-10195-3
[35]	<a href="http://www.keramverband.de/brevier_dt/5/3/3/5_3_3_4.htm">http://www.keramverband.de/brevier_dt/5/3/3/5_3_3_4.htm</a> 29.07.2013 11:36
[36]	CARES Theory Guide CERAMICS ANALYSIS ANDRELIABILITY EVALUATION OF STRUCTURES Copyright © Connecticut Reserve Technologies, Inc. September 13, 2007 <a href="http://www.ceramicreliability.com/software/support/docs/CARES81_Theory_Guide.pdf">http://www.ceramicreliability.com/software/support/docs/CARES81_Theory_Guide.pdf</a> 29.07.2013 11:37
[37]	Interdependency of mechanical failure rate of encapsulated solar cells and module design parameters Sascha Dietrich, Martin Sander, Matthias Pander, Matthias Ebert aFraunhofer - Center for Silicon Photovoltaics, Walter-Huelse-Str. 1, 06120 Halle (Saale), Germany
[38]	CRACK STATISTIC OF CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULES M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Jahn Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany
[39]	Mechanical investigations on metallization layouts of solar cells with respect to

	<p>module reliability</p> <p>Sascha Dietrich, Matthias Pander, Martin Sander, Matthias Ebert Fraunhofer Center for Silicon-Photovoltaics, Walter-Huelse-Str. 1,06120 Halle (Saale), Germany</p> <p>Silicon PV: March 25-27, 2013, Hamelin, Germany</p>
[40]	<p>Risse in Solarzellen - Untersuchung der Rissentstehung, des Rissfortschritts in eingebetteten Solarzellen</p> <p>Matthias Ebert, Sascha Dietrich, Martin Sander, Matthias Pander 2013</p>
[41]	<p>Mechanical and Thermo-Mechanical Assessment of Encapsulated Solar Cells by Finite-Element-Simulation</p> <p>Sascha Dietrich, Matthias Pander, Martin Sander, Matthias Ebert Fraunhofer – Center for Silicon Photovoltaics, Walter-Huelse-Str. 1, 06766 Halle (Saale), Germany 2010</p>
[42]	<p>Grundlagen der Fertigungstechnik</p> <p>Birgit Awiszus, Jürgen Bast, Holger Dürr, Klaus-Jürgen Matthes (Hrsg.) (2009) 4., aktualisierte Auflage Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag ISBN 978-3-446-41757-1</p>
[43]	<p><a href="http://www.all-electronics.de/upl/images/standalone_gallery/6255/510x800/20183.jpg">http://www.all-electronics.de/upl/images/standalone_gallery/6255/510x800/20183.jpg</a></p>
[44]	<p><a href="http://www.importe-uzman.de/images/lotbad/sp41_2.jpg">http://www.importe-uzman.de/images/lotbad/sp41_2.jpg</a> 22.07.2013 07:56</p>
[45]	<p><a href="http://www.vierling.de/uploads/pics/Wellenloeten.jpg">http://www.vierling.de/uploads/pics/Wellenloeten.jpg</a> 22.07.2013 14:45</p>
[46]	<p>HdFTWEKA Praxishandbuch Instandhaltung ISBN/EAN:978-3-8111-9777-0 Ausgabe: 1995</p>



	Kissing : WEKA-Medien Georg-Wilhelm Werner
[47]	<a href="http://www.alducto.ch/projekt/flammloeten/flammloeten.jpg">http://www.alducto.ch/projekt/flammloeten/flammloeten.jpg</a> 02.08.2013 10:04
[48]	<a href="http://www.precoplat.de/si_tpl/procurement06.php?cnt=../tec_tpl/cnt_gloss_r.php">http://www.precoplat.de/si_tpl/procurement06.php?cnt=../tec_tpl/cnt_gloss_r.php</a> 30.07.2013 09:35
[49]	<a href="http://www.semiconductor-scout.com/component/content/article/33-glossary/439.html">http://www.semiconductor-scout.com/component/content/article/33-glossary/439.html</a> 30.07.2013 13:35
[50]	Handbuch der Fertigungstechnik Band 5 Fügen Handhaben Montieren G. Spur, Th. Stöferle Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Günter Spur Carl Hanser Verlag München Wien Ausgabe: 1986 ISBN 3-446-12536-1
[51]	<a href="http://www.elk-tronic.de/Services/Pictures/Heizplatte.jpg">http://www.elk-tronic.de/Services/Pictures/Heizplatte.jpg</a> 24.07.2013 11:59
[52]	Praktische Elektronik 1288 • FA 12/09 © Box 73 Amateurfunkservice www.funkamateure.de GmbH 2009 SMD-Reflow-Löten für Amateure NORBERT GRAUBNER – DL1SNG
[53]	Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik Andreas Risse Beuth Hochschule für Technik Berlin Vieweg+Teubner Verlag   Springer Fachmedien Wiesbaden 2012 ISBN 987-3-8348-1519-4
[54]	Laserlöten mit Hochleistungsdiodenlaser Wolf Produktionssysteme GmbH

---

	Broschüre
[55]	<a href="http://www.leister.com/uploads/images/contents/lasersystems/smd_loeten.jpg">http://www.leister.com/uploads/images/contents/lasersystems/smd_loeten.jpg</a> 24.07.2013 15:30
[56]	<a href="http://www.all-electronics.de/bildergalerien/anzeigen/6255/5/text/41835/Selektives-Einzelpunktloeten">http://www.all-electronics.de/bildergalerien/anzeigen/6255/5/text/41835/Selektives-Einzelpunktloeten</a> 24.07.2013 09:31
[57]	Praktikumsbericht Erstellung eines detaillierten FEM-Modells einer Solarzelle im ANSYS-classic als Grundlage für spätere Berechnungen Marius Zimmermann
[58]	ANSYS Hilfe
[59]	<a href="http://www.schlenk.com/fileadmin/editorsCMS/uploads/PDF/Metallfolien_Solar_Datenblaetter/Zellverbinder_Krist_Mod_EN.pdf">http://www.schlenk.com/fileadmin/editorsCMS/uploads/PDF/Metallfolien_Solar_Datenblaetter/Zellverbinder_Krist_Mod_EN.pdf</a> 16.09.2013 08:12

## Anhang

### Relative Darstellung der Veränderungen der Hauptspannungen in den Parameterstudien

#### Breite Solarzellenverbinder

#### Parameterstudie I

Dicke Kupfer = 0,074 mm

Dicke Lot = 0,017 mm

X260:

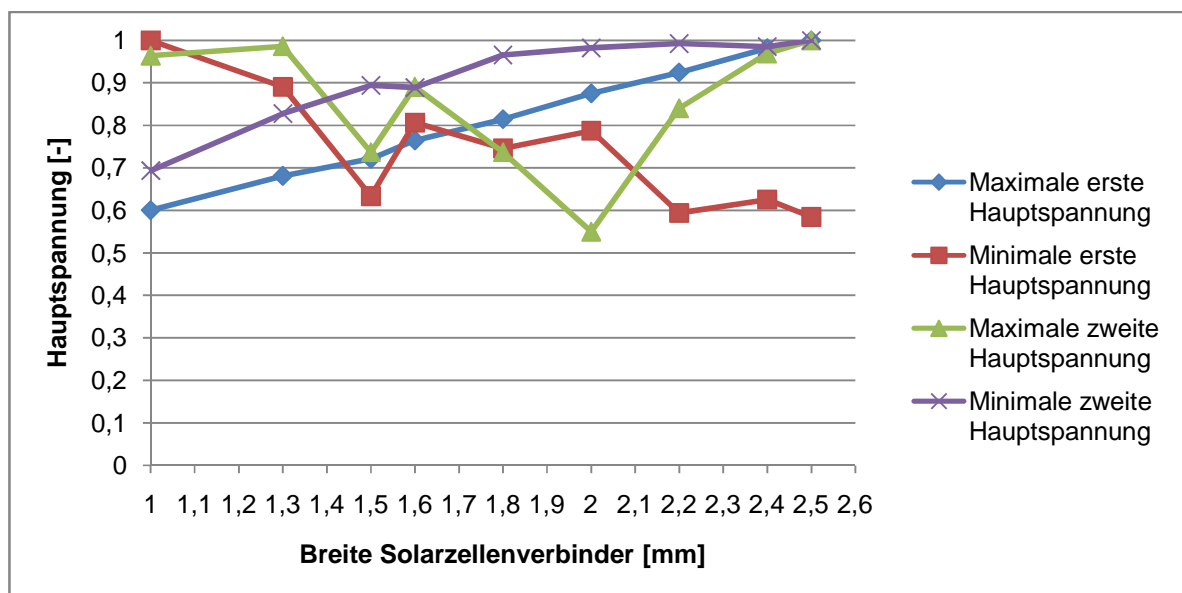


Abbildung 108: Relative Darstellung der Hauptspannungen X260

X26U:

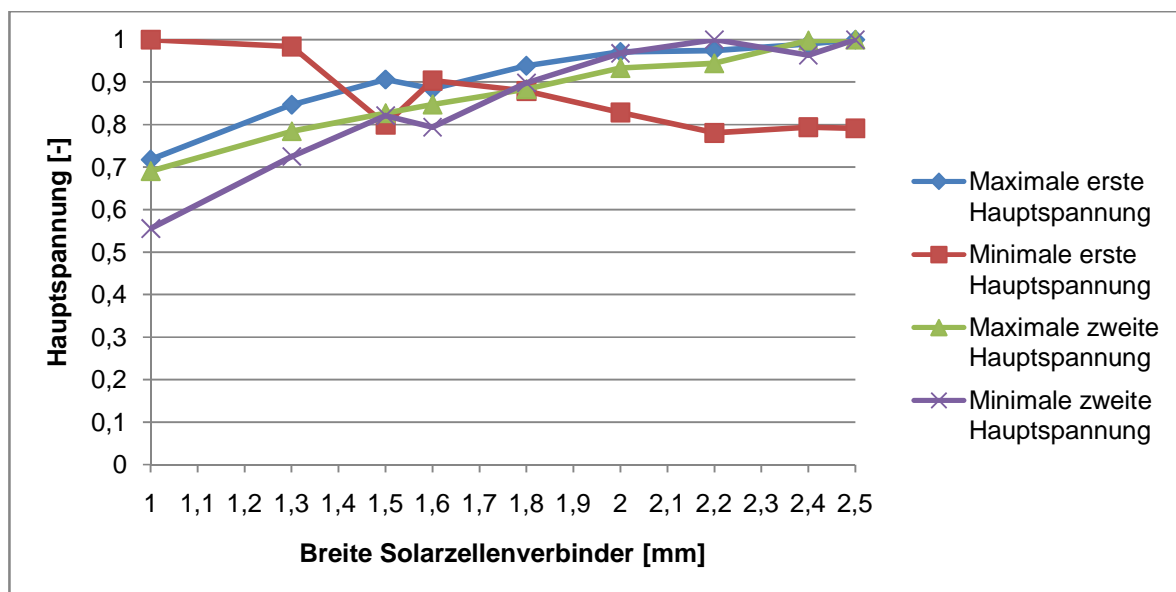


Abbildung 109: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U

## Parameterstudie II

Dicke Kupfer = 0,111 mm

Dicke Lot = 0,0255 mm

X26O:

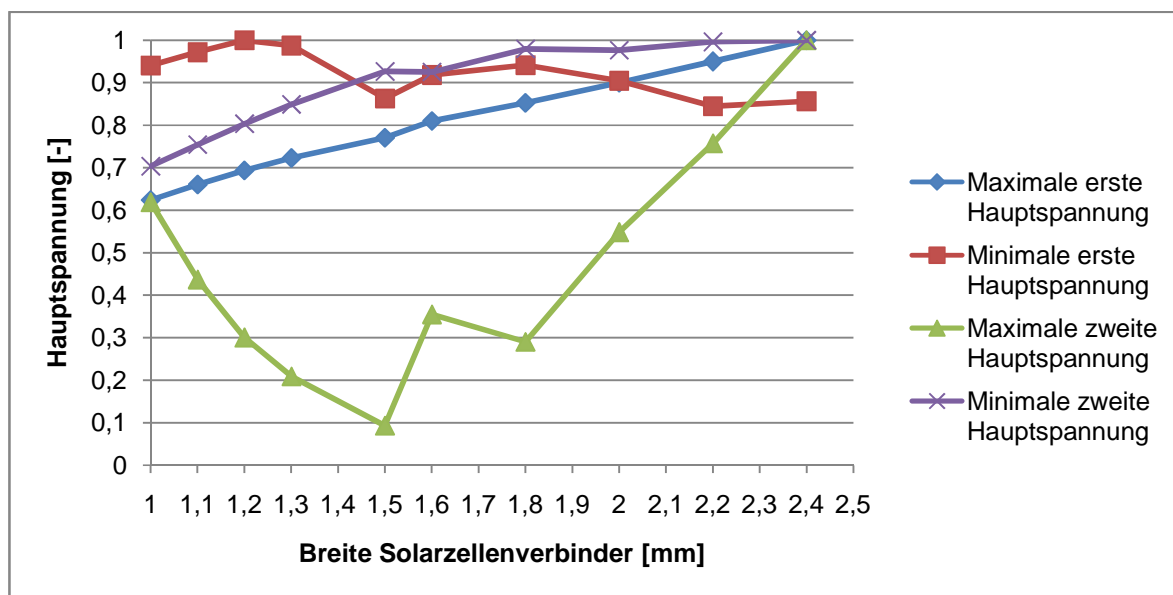


Abbildung 110: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O

X26U:

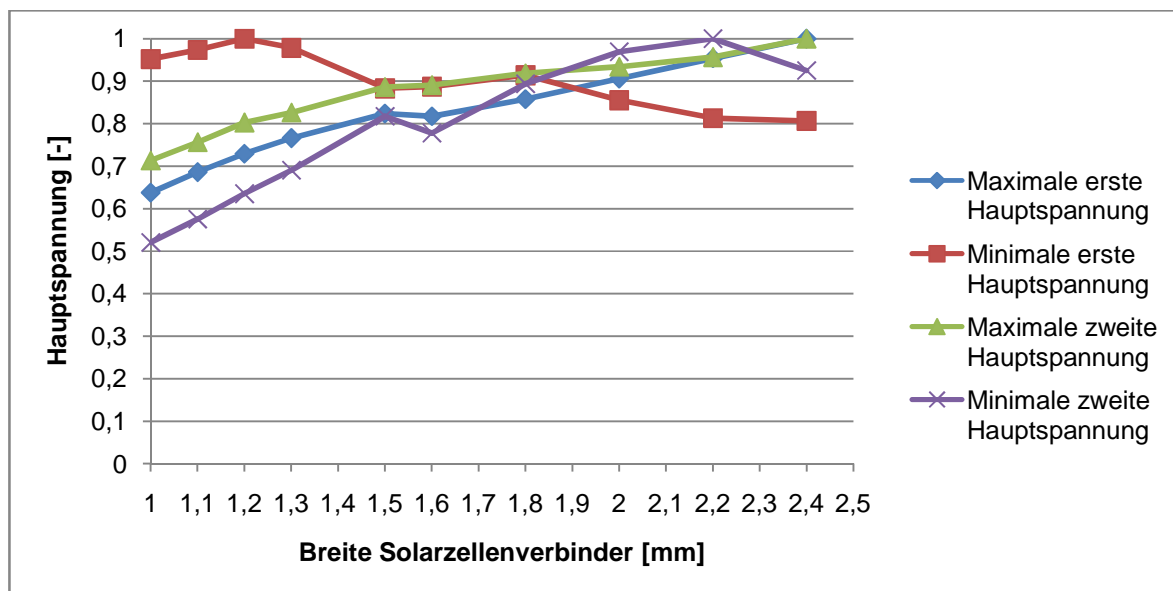


Abbildung 111: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U

### Parameterstudie III

Dicke Kupfer = 0,148 mm

Dicke Lot = 0,034 mm

X26O:

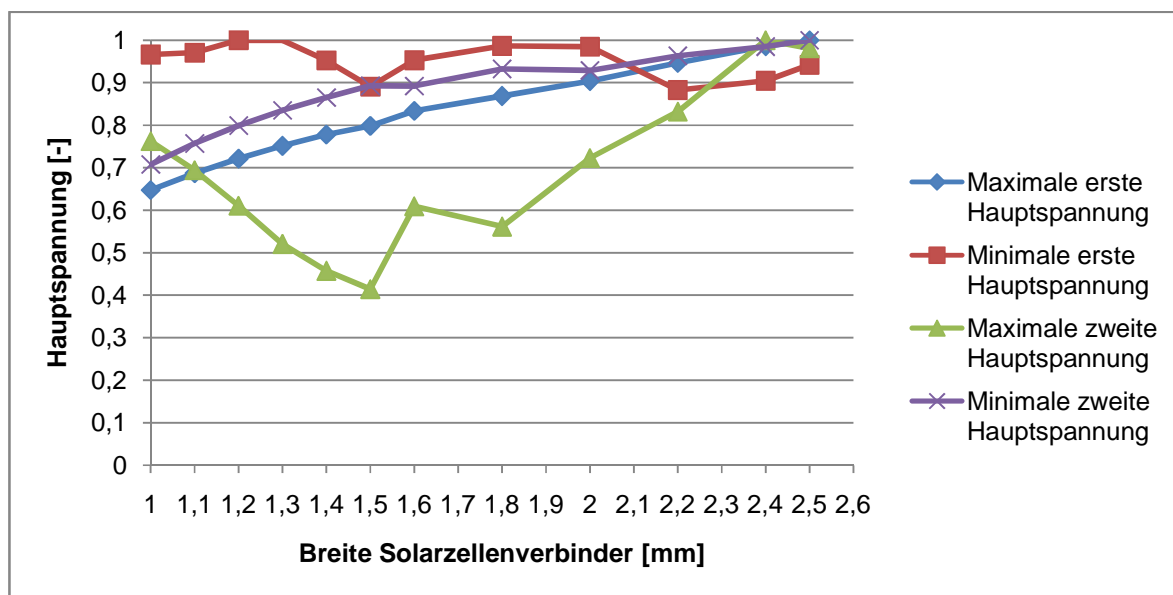


Abbildung 112: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O

X26U:

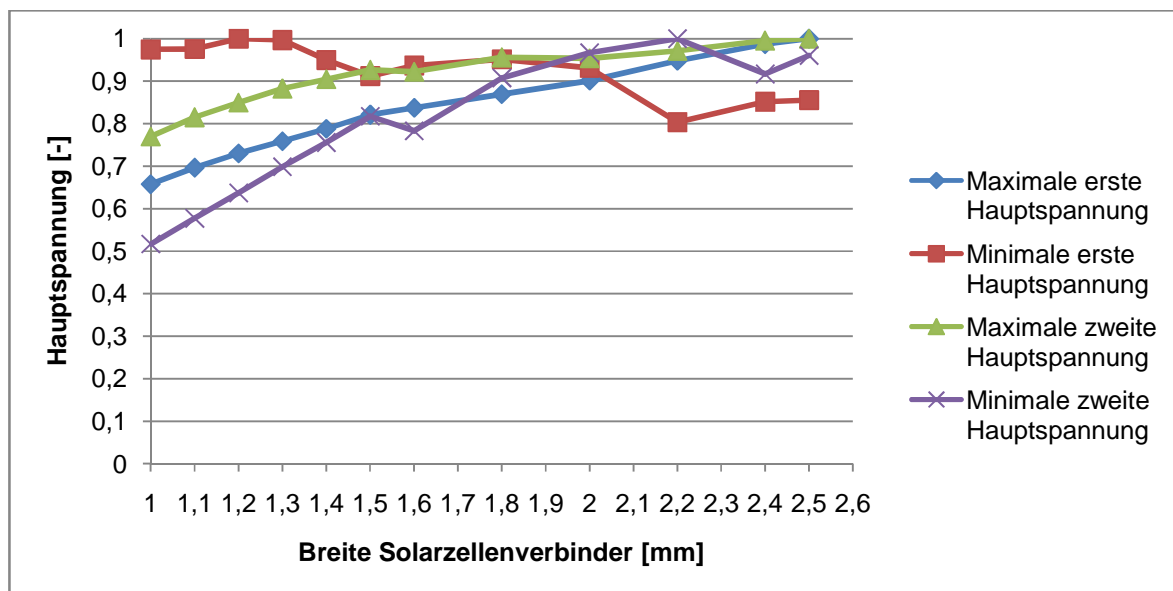


Abbildung 113: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U

## Parameterstudie IV

Dicke Kupfer = 0,185 mm

Dicke Lot = 0,0425 mm

X26O:

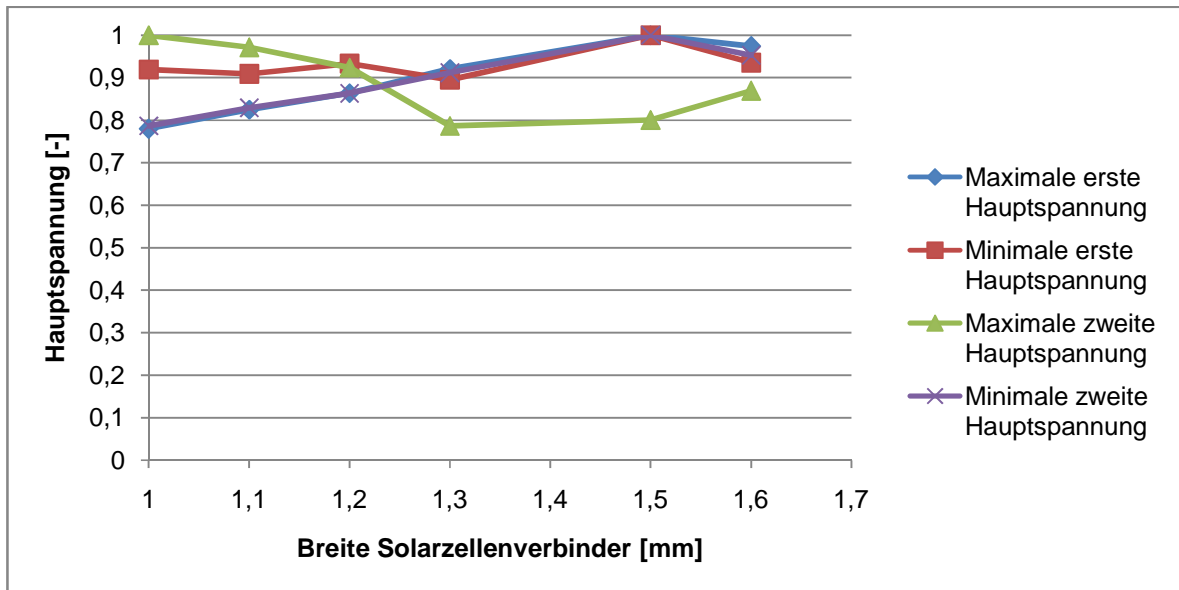


Abbildung 114: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O

X26U:

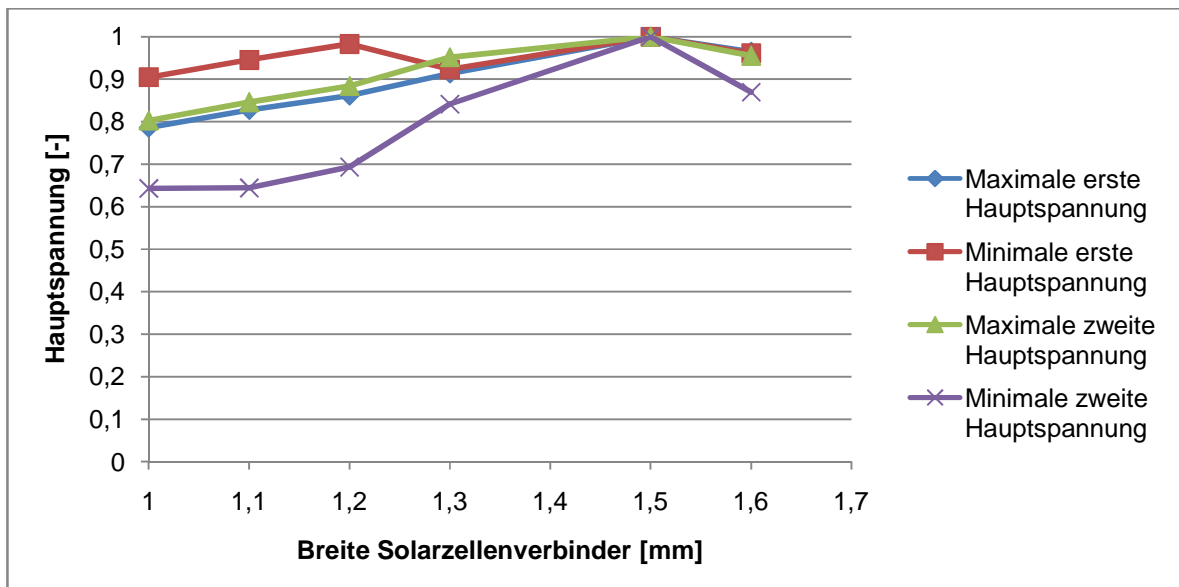


Abbildung 115: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U

## Temperaturverlauf

X26O:

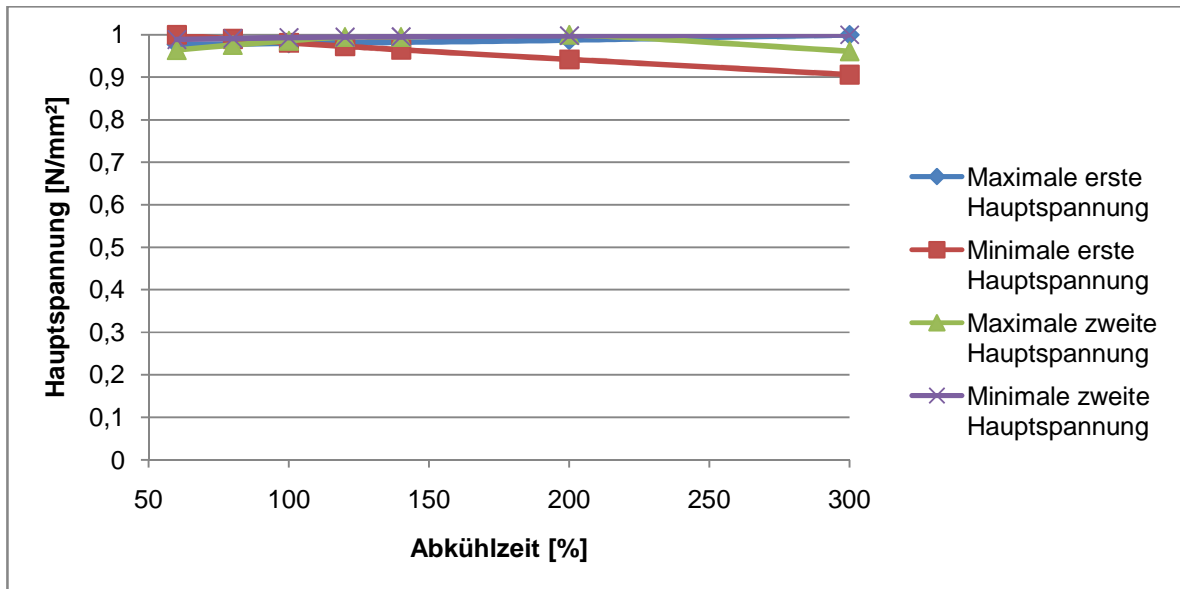


Abbildung 116: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26O

X26U:

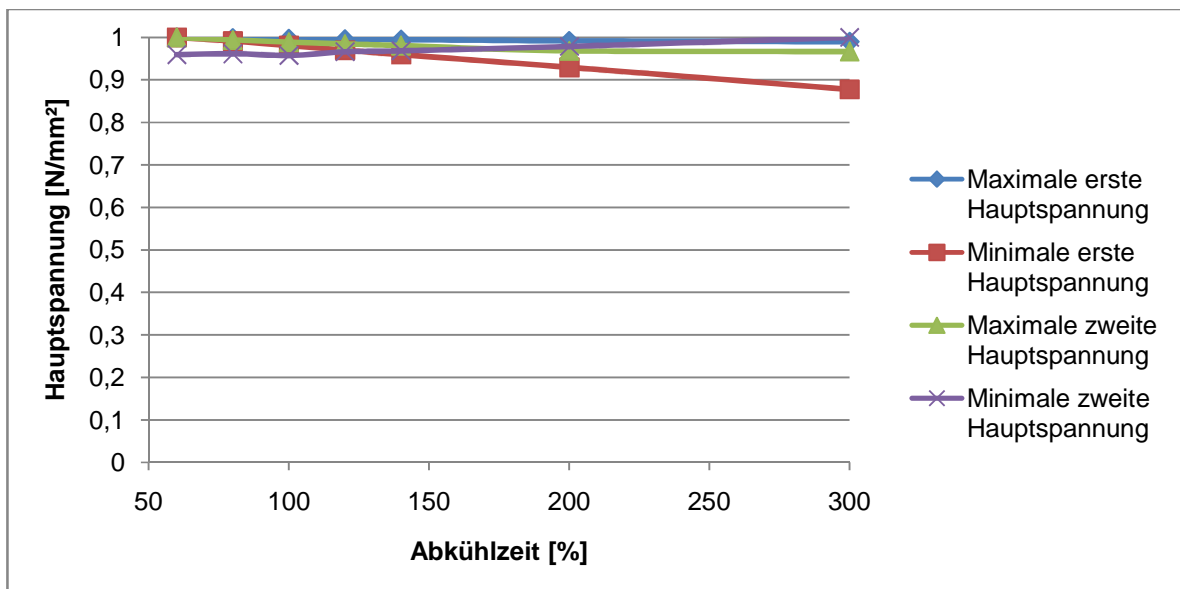


Abbildung 117: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U



## Lotdicke

X260:

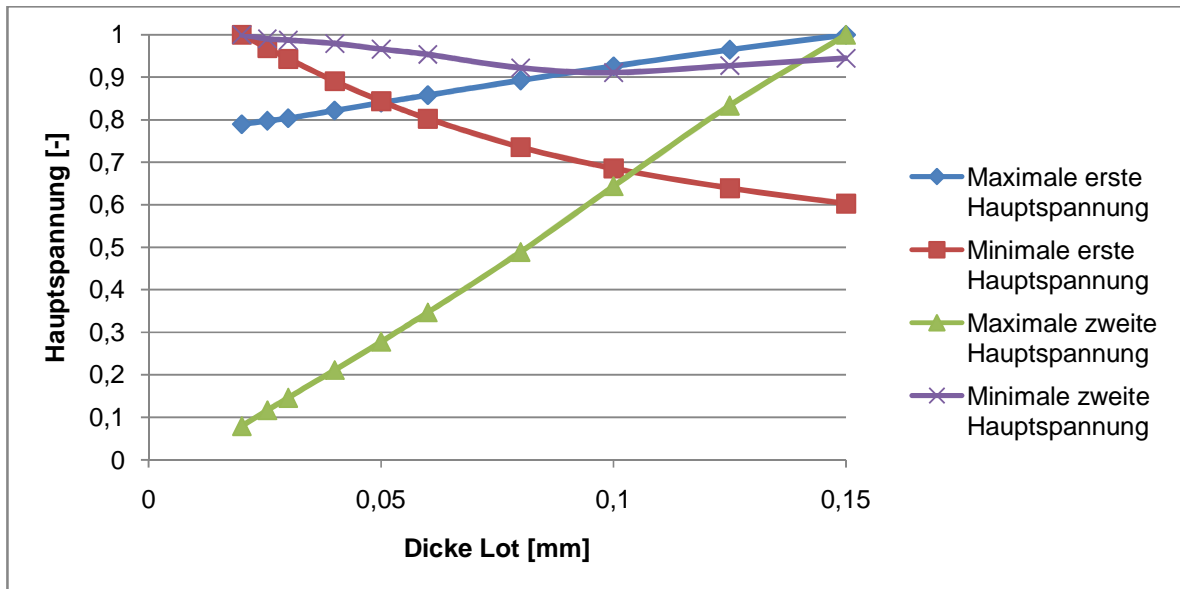


Abbildung 118: Relative Darstellung der Hauptspannungen X260

X26U:

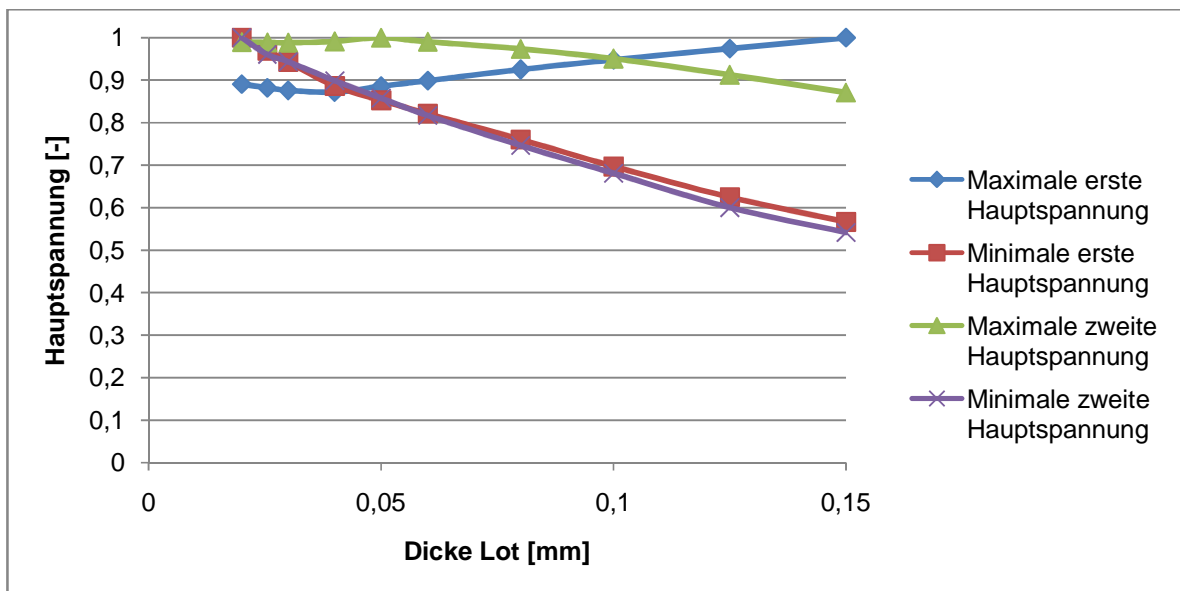


Abbildung 119: Relative Darstellung der Hauptspannungen X26U

## Versatz des Solarzellenverbinders

Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Oberseite)

Y90:

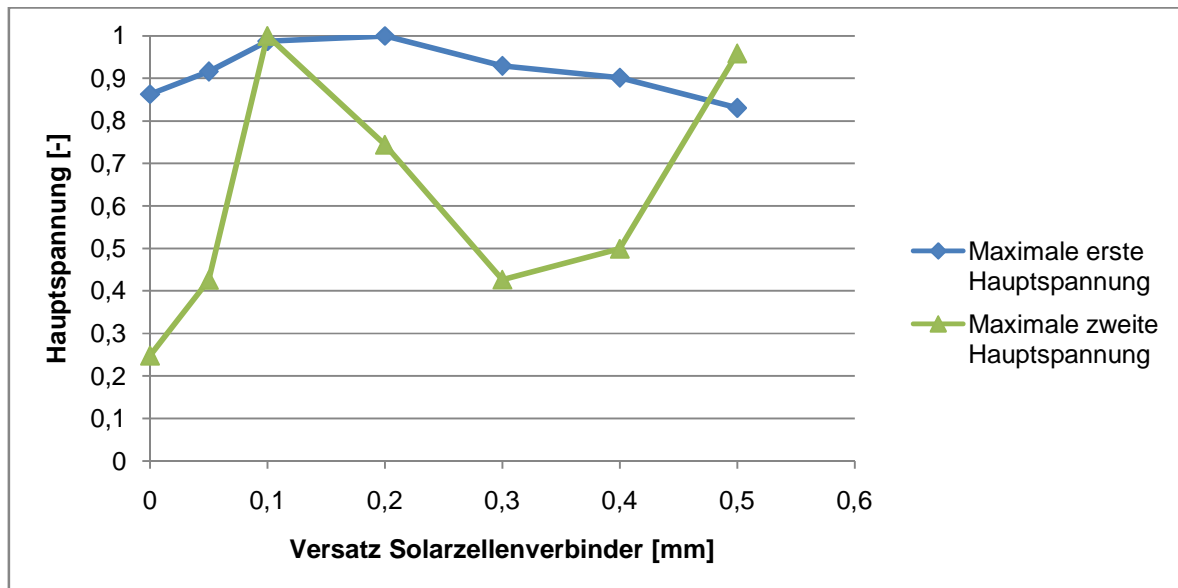


Abbildung 120: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y90

Y15U:

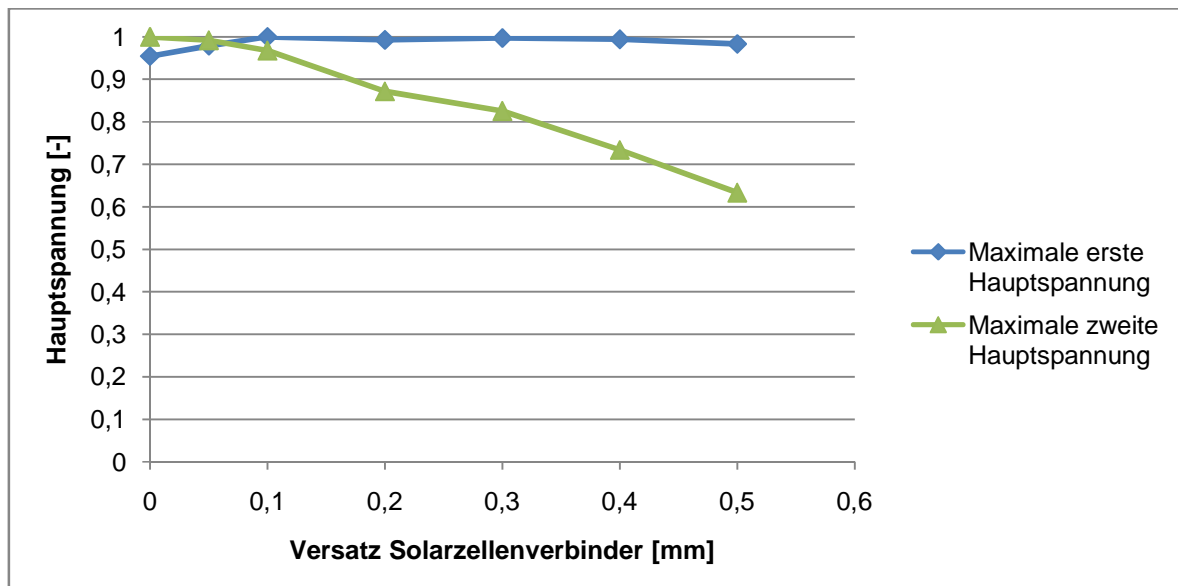


Abbildung 121: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y150

## Ein Solarzellenverbinder mit Versatz (Unterseite)

Y90:

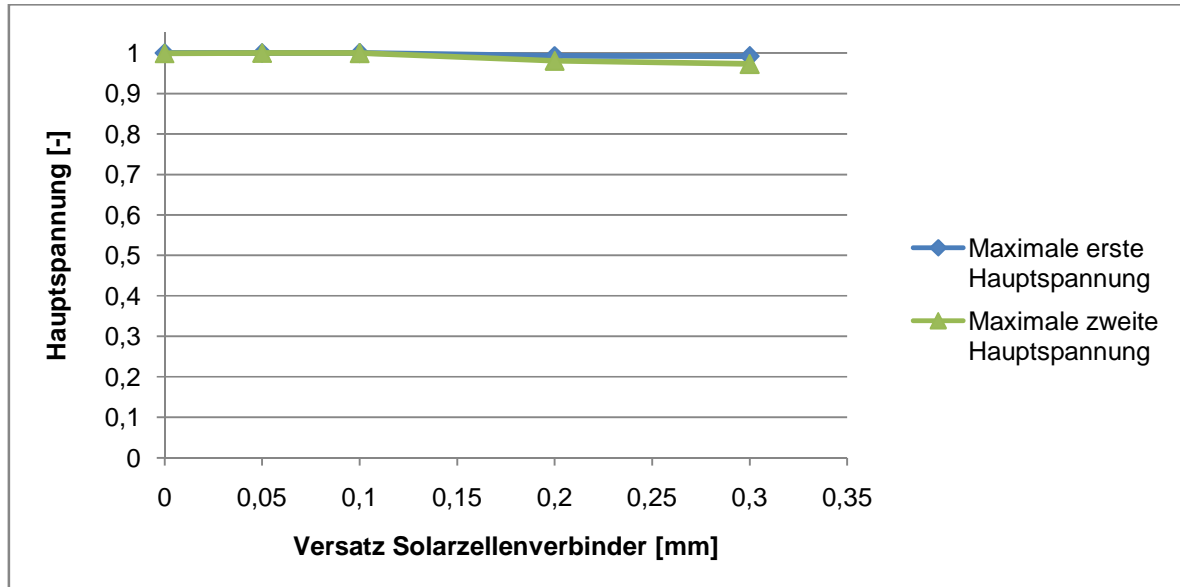


Abbildung 122: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y90

Y15U:

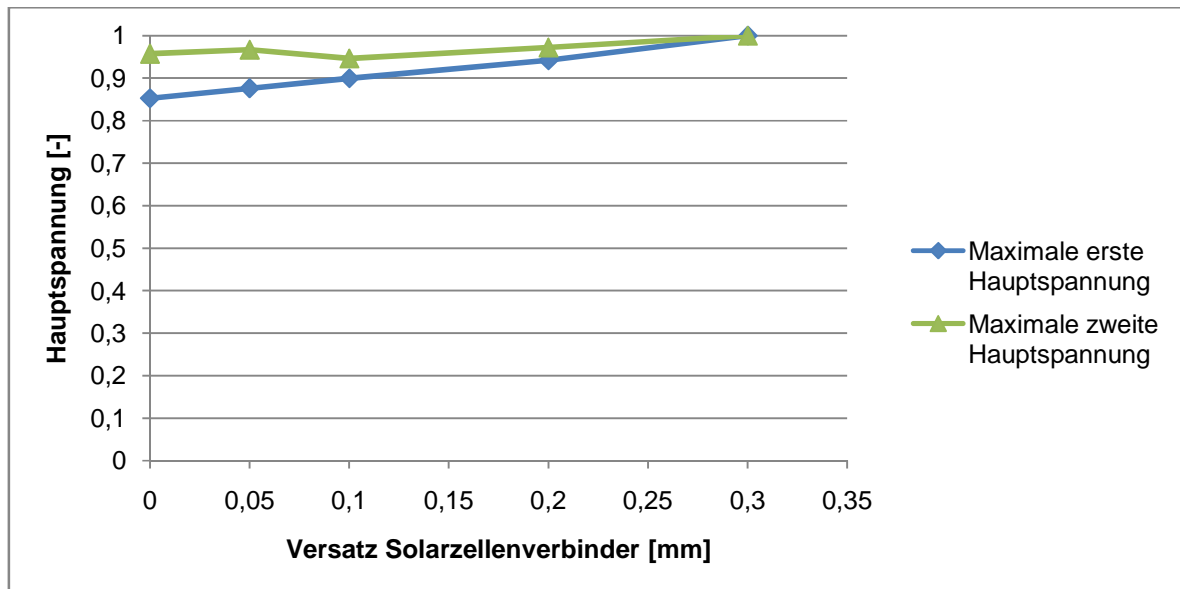


Abbildung 123: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y150

## Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (selbe Richtung)

Y90:

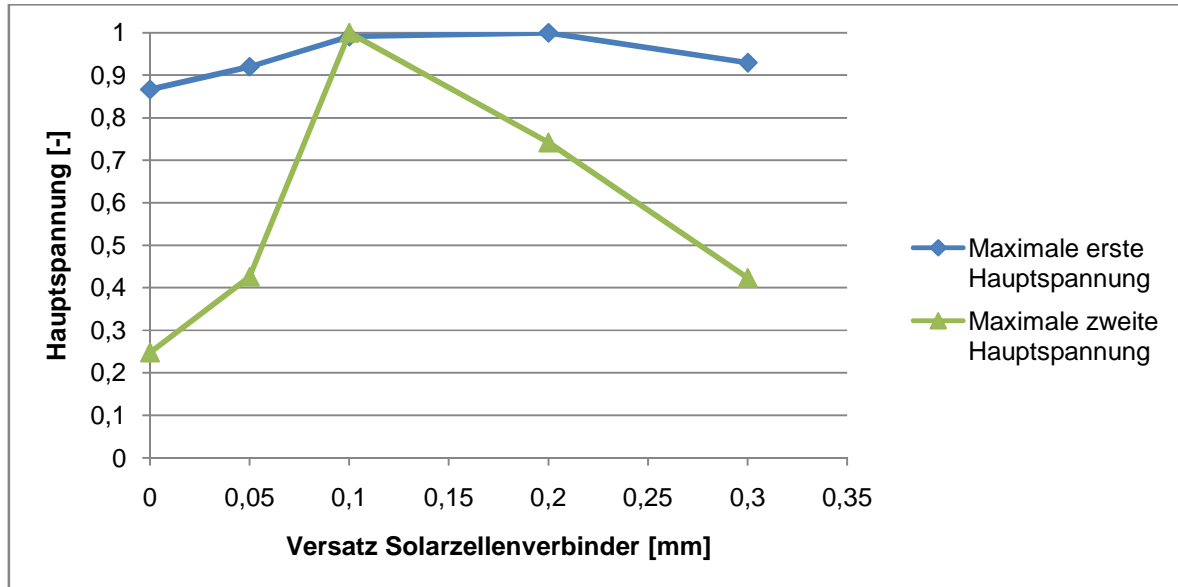


Abbildung 124: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y90

Y15U:

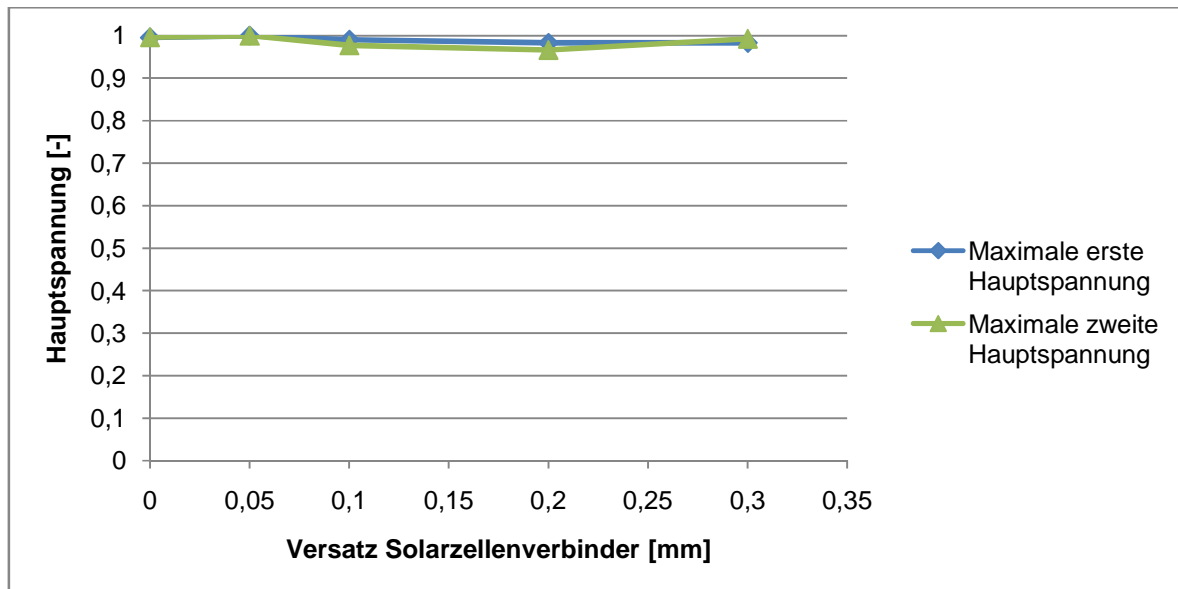


Abbildung 125: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y150

## Zwei Solarzellenverbinder mit Versatz (unterschiedliche Richtung)

Y90:

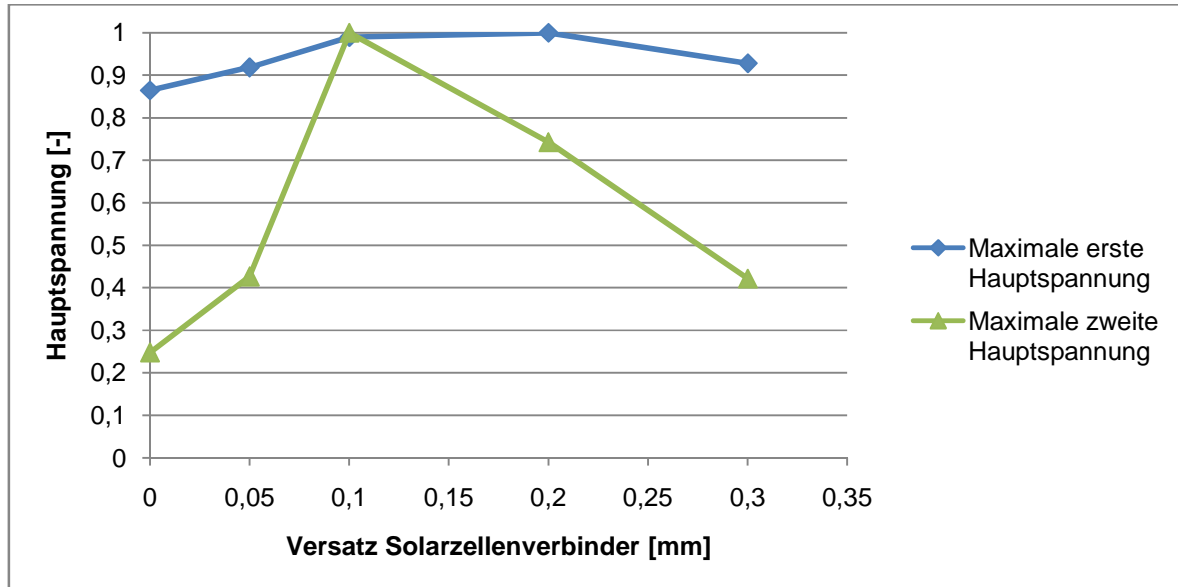


Abbildung 126: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y90

Y15U:

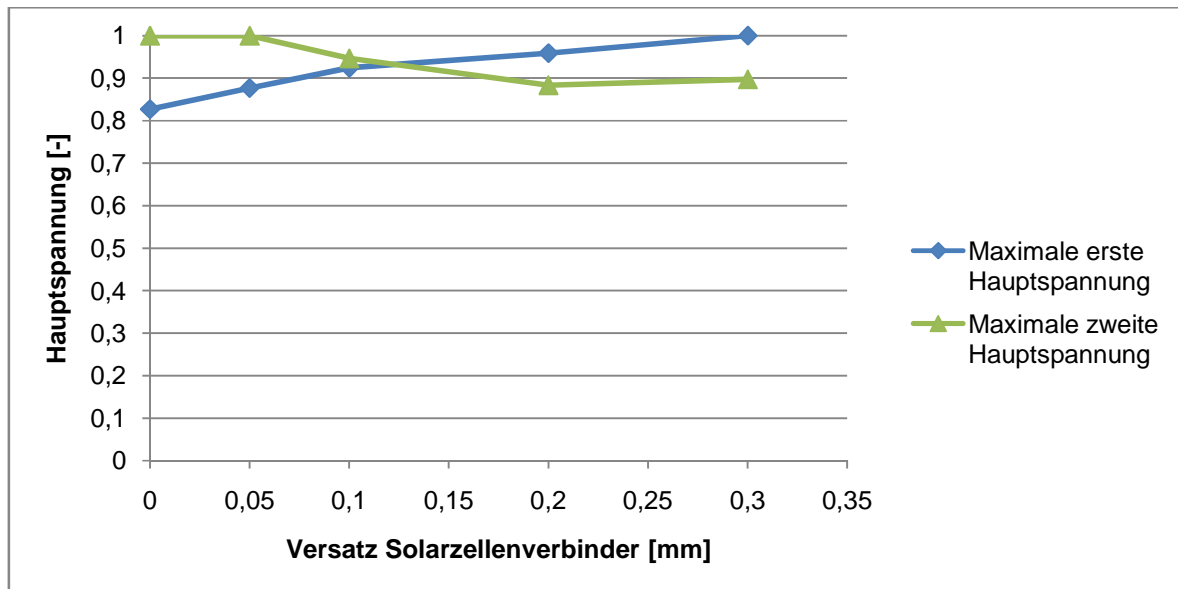


Abbildung 127: Relative Darstellung der Hauptspannungen Y150

