

## Diplomarbeit

# **Kontaktierungsmethoden von Silizium-Solarzellen mit verzinnnten Kupferdrähten**

ausgeführt am

Atominstitut der österreichischen Universitäten

unter Anleitung von

Ao. Univ. Prof. Johann Summhammer

durch

Michael Stietka

1220 Wien, Pilotengasse 49

Wien im Juli 2010

## Danksagung

Vorab danke ich jenen, die meine Arbeit ermöglicht oder unterstützt haben:

Ao. Univ. Prof. Johann Summhammer, welcher mir das Thema bereitstellte, und mich geduldig fachlich mit stets einem offenen Ohr betreut hat.

Ao. Univ. Prof. Ernst Bauer für die Hilfe bei den Voruntersuchungen im Bereich der Ultraschalllötung.

Hr. Tischler und sein Werkstattteam, welches mit Rat und Tat bei der Umsetzung meiner Konstruktionen bereitstand und dabei die Präzision der zur Verfügung stehenden Gerätschaften bis aufs äußerste ausreizte.

Dem Feindrahtwerk Adolf Edelhoff, im Besonderen Herrn Fiolka meinem dortigen Ansprechpartner, welches als einzige unter vielen Firmen die Feindrähte in der notwendigen Ausführung herstellen konnte und zu Forschungszwecken kostenlos zur Verfügung stellte.

# Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                                                             |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Kurzfassung .....                                                                                           | 5  |
| 2     | Physikalische Grundbegriffe .....                                                                           | 7  |
| 2.1   | Das Air Mass .....                                                                                          | 7  |
| 2.2   | Der Schichtwiderstand .....                                                                                 | 9  |
| 2.3   | Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient .....                                                                  | 10 |
| 3     | Herstellungsprozess einer Standardsiliziumsolarzelle .....                                                  | 12 |
| 3.1   | Technologie zur Herstellung multikristalliner Wafer .....                                                   | 12 |
| 3.2   | Technologien zur Herstellung multikristalliner Siliziumsolarzellen.....                                     | 14 |
| 3.3   | Technologien zur Reinigung und Texturierung .....                                                           | 14 |
| 3.4   | Technologien zur Herstellung des pn-Übergangs .....                                                         | 15 |
| 3.5   | Technologien zur Herstellung einer Antireflexschicht, zur Oberflächenpassivierung und Kantenisolierung..... | 18 |
| 3.6   | Technologien zur Kontaktierung einer Siliziumsolarzelle .....                                               | 19 |
| 4     | Moderne Kontaktierungsmethoden.....                                                                         | 21 |
| 4.1   | Buried Contact Zellen .....                                                                                 | 21 |
| 4.1.1 | Angled Buried Contact Zellen .....                                                                          | 23 |
| 4.1.2 | Screen Printed Laser Grooved Buried Contact Solar Zellen .....                                              | 24 |
| 4.1.3 | Mehrfach bedruckte Zellen mit hohem Querschnittsverhältnis.....                                             | 25 |
| 4.2   | Metal-Wrap-through und Emitter-Wrap-through Zellen.....                                                     | 26 |
| 4.3   | Galvanisierte Metallisierung.....                                                                           | 28 |
| 4.4   | Innovative Zelle der Firma Day4Energy.....                                                                  | 28 |
| 5     | Die Versuchszelle.....                                                                                      | 30 |
| 6     | Verlustmechanismen.....                                                                                     | 32 |
| 6.1   | Verluste einer Siliziumsolarzelle bezogen auf das Bandgap .....                                             | 32 |
| 6.2   | Verluste einer realen Siliziumsolarzelle .....                                                              | 33 |
| 6.2.1 | Elektrische Verluste .....                                                                                  | 33 |
| 6.2.2 | Optische Verluste .....                                                                                     | 39 |
| 7     | Die Grundidee .....                                                                                         | 42 |
| 7.1   | Der Draht .....                                                                                             | 44 |

|      |                                                                      |     |
|------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 8    | Vorabsimulationen.....                                               | 46  |
| 8.1  | Berechnung der Verlustleistung in der Rückseitenmetallisierung ..... | 50  |
| 8.2  | Berechnung der Verlustleistung in den Bussen der Vorderseite .....   | 53  |
| 8.3  | Verluste in den Bussen der Rückseite .....                           | 54  |
| 8.4  | Mechanische Spannungen verursacht durch Löten .....                  | 55  |
| 8.5  | Verluste in den Fingerteilstücken.....                               | 58  |
| 9    | Ergebnisse der Vorabrechnungen .....                                 | 60  |
| 10   | Die Versuchsaufbauten .....                                          | 67  |
| 10.1 | Das Flussmittel .....                                                | 68  |
| 10.2 | Die Vorversuche .....                                                | 68  |
| 10.3 | Der Spannrahmen.....                                                 | 72  |
| 10.4 | Lampenversuche .....                                                 | 75  |
| 10.5 | Die Lötwalze .....                                                   | 76  |
| 10.6 | Der Lötstempel.....                                                  | 80  |
| 10.7 | Versuche mit Lötpaste.....                                           | 83  |
| 11   | Auswertung der Versuchsreihe .....                                   | 85  |
| 11.1 | Messungen des Füllfaktors.....                                       | 94  |
| 11.2 | Weitere Messergebnisse .....                                         | 95  |
| 12   | Fazit.....                                                           | 96  |
| 13   | Anhang .....                                                         | 99  |
| 14   | Literaturverzeichnis .....                                           | 103 |

# 1 Kurzfassung

Wie allseits bekannt sind photovoltaische Solarzellen ein bedeutender Hoffnungsträger und mittlerweile Wirtschaftszweig im Bereich erneuerbare Energien. Sie soll in Zukunft einen wichtigen nachhaltigen Teil der Energieversorgung leisten. Weltweit bieten zahlreiche Regierungen der diesbezüglichen Forschungen einen Anreiz durch bedeutsame finanzielle Förderungen.

Die vorliegende Arbeit aus dem Gebiet der Photovoltaik beschäftigt sich mit dem Thema der Kontaktierung von Solarzellen aus Silizium. Sie stellt eine neue Methode der Kontaktierung vor. Die der Arbeit zu Grunde liegenden Versuche und Messungen wurden mit handelsüblichen multikristallinen Standardsiliziumzellen mit einer Phosphor-Bordotierung durchgeführt. Einer Anwendung des entwickelten Kontaktierungsverfahrens auf monokristalline Zellen widerspricht jedoch nichts.

Grundkonzept des neuen Verfahrens, der Feindrahtkontaktierung, ist der Verzicht auf Busse in Form von Kupferbändern wie sie bei der standardmäßigen Kontaktierung verwendet werden. Anstelle derer treten viele dünne Kupferfeindrähte. Diese sollen direkt auf die Finger des üblichen Fingergrids gelötet werden und möglichst deckungsgleich auf den aufgesinterten Fingern haften. Die Kupferdrähte sind stark vorverzinkt und wenn möglich nur mittels dieser Eigenverzinnung zu verlöten.

Die erste Phase der Arbeit betrifft Vorabschätzungen der erhofften Leistungssteigerungen durch verringerte Abschattung und verringerte Ohmsche Verluste bei feindrahtkontaktierten Zellen anhand von Berechnungen.

Der praktische Arbeitskern und dessen Protokollierung ist eine Untersuchung der Durchführbarkeit der Feindrahtkontaktierung. Augenmerk liegt dabei auf Haftung der Lötstellen und der Deckungsgleichheit bzw. Präzision bei der Lötung. Hierzu war einerseits eine exakt justierbare Halterung der Drähte zu konstruieren, andererseits wurden mehrere unterschiedliche Lötvorrichtungen geplant, gebaut und getestet. Mit diesen wurde eine Reihe von Testzellen hergestellt.

Abschließend wurden die Leistungssteigerung der Testzellen durch die Feindrahtkontaktierung und weitere Parameter in mehreren Messreihen untersucht.

## 2 Physikalische Grundbegriffe

### 2.1 Das Air Mass

Die Luftmasse (englisch Air mass, kurz AM) ist in der Astronomie ein relatives Maß für die Länge des Weges, den das Licht der Sonne durch die Atmosphäre der Erde bis zum Erdboden zurücklegt. Sie ist definiert als Verhältnis der jeweiligen Weglänge  $l$  bezogen auf die minimale Länge  $l_0$  bei senkrechtem Lichteinfall [1]:

$$AM = \frac{l}{l_0} \quad (2.1)$$

AM0 entspricht der extraterrestrischen Strahlungsleistung außerhalb der Erdatmosphäre; das Integral über das Spektrum hat dort eine durchschnittliche Energiestromdichte von  $1367 \text{ W/m}^2$  (Solarkonstante). Die Solarkonstante variiert im Lauf eines Jahres um etwa  $\pm 3,4\%$  wegen der elliptischen Erdbahnbahn.

AM1 entspricht der Strahlungsleistung bei senkrechtem Einfall von Sonnenlicht am Äquator auf Meereshöhe. Bei senkrechtem Lichteinfall auf die Erdoberfläche ist die Energiestromdichte  $1070 \text{ W/m}^2$ , und der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre ist am kürzesten.

Bei AM1.5 durchstrahlt das Sonnenlicht gegenüber senkrechtem Einfall auf Meereshöhe die 1.5 fache Luftmasse; für  $AM = 1.5$  ergibt sich ein Zenitwinkel von etwa  $48,2^\circ$ . [2] Bei diesem Spektrum beträgt die Energiestromdichte  $1000 \text{ W/m}^2$ ; aus diesem Grund wurde  $AM = 1.5$  als Standardwert für die Vermessung von Solarmodulen eingeführt.

Das Spektrum der Solarstrahlung ist abhängig von der Weglänge des Lichts durch die Atmosphäre. Jeweiligen Weglängenwerten sind entsprechende Spektren und Strahlungsleistungen zugeordnet. Die Absorption rührt hauptsächlich von Gasen geringer Konzentration her, wie von Wasserdampf  $\text{H}_2\text{O}$ , Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , Lachgas  $\text{NO}_2$ , Methan  $\text{CH}_4$ , Fluorkohlenwasserstoffe und auch von Staub im Infrarot-, und von Sauerstoff und Ozon im Ultraviolett-Bereich (siehe Abbildung 1). Neben der Ab-

sorption kommt es durch Rayleigh- und Mie-Streuung zu einer spektralen Verschiebung. Rayleigh-Streuung streut kurzwelliges Licht stärker. [3]

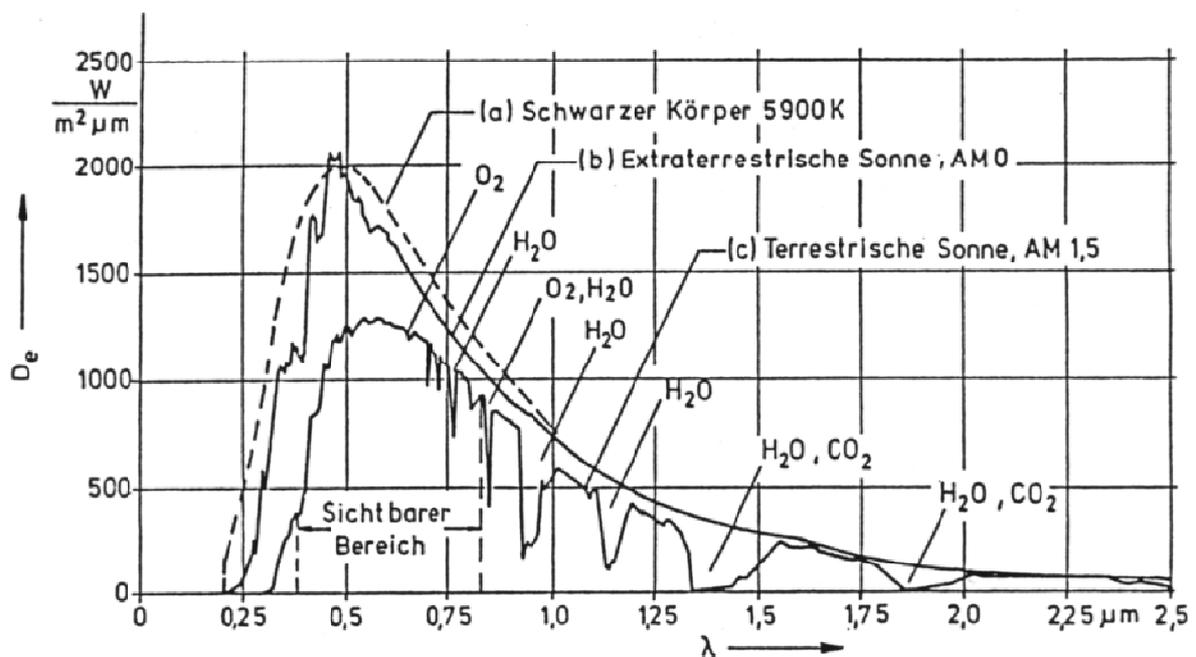


Abbildung 1: Strahlungsleistung der Sonne für verschiedene AMs in Abhängigkeit der Wellenlänge [4]

Das von der Sonne abgestrahlte Spektrum entspricht nicht dem eines schwarzen Strahlers. Die äußeren Schichten der Sonne absorbieren gewisse Anteile des Spektrums (Fraunhoferlinien).

Entlang des 48.2° Grades nördlicher Breite (z.B.: Karlsruhe 49° nördliche Breite) variiert der Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung zwischen  $48.2^\circ - 23.5^\circ = 24.7^\circ$  bei Sommersonnwende am 21. Juni und  $48.2^\circ + 23.5^\circ = 71.7^\circ$  bei Wintersonnwende am 21. September. Bei Frühlingsbeginn und Herbstanfang, wo die Sonne über dem Äquator steht, ist der Zenitwinkel gleich dem Breitengrad.

Die maximale Energiestromdichte variiert von tropischen zu gemäßigten Zonen nur wenig. Größer sind die Unterschiede der Energiemenge, die pro Jahr auf eine horizontale Fläche einfällt. In Deutschland sind das rund  $1000 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$ . Dies sind 1000 Stunden Sonnenschein pro Jahr und Quadratmeter horizontaler Fläche bei

AM1.5. Der größte Wert wird mit  $2500\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  in Saudi-Arabien erreicht. Das ergibt eine gemittelte Energiestromdichte von  $281\text{W}/\text{m}^2$  auf eine horizontale Fläche. Im Vergleich dazu gilt für Deutschland  $115\text{W}/\text{m}^2$ . Der Mittelwert für die ganze Erde liegt bei  $230\text{W}/\text{m}^2$ .

## 2.2 Der Schichtwiderstand

Der Schichtwiderstand  $R_s$  ist der elektrische Widerstand dünner Schichten mit gleichmäßiger Dicke bezogen auf elektrische Ströme in der Schichtebene. Die Einheit des Schichtwiderstandes ist Ohm  $[\Omega]$ . Der Zusammenhang mit dem Widerstand  $R$  lässt sich durch folgende Formel darstellen bzw. definieren:

$$R = \frac{U}{I} = R_s \frac{l}{b} = \rho \frac{l}{bd} \quad (2.2)$$

b...Breite eines Flächenstücks einer Fläche mit dem Schichtwiderstand  $R_s$

l...parallel zur Länge  $l$  des rechteckigen Flächenstück einer Fläche mit dem Schichtwiderstand  $R_s$  fließt der Strom  $I$  mit gleichmäßiger Stromdichte  $j$  auf der ganzen Fläche; über der Länge  $l$  fällt die Spannung  $U$  ab;

d...Dicke der Schicht im Zusammenhang mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$

Der Schichtwiderstand einer Fläche kann mittels einer Vierpunktmessung gemessen werden.

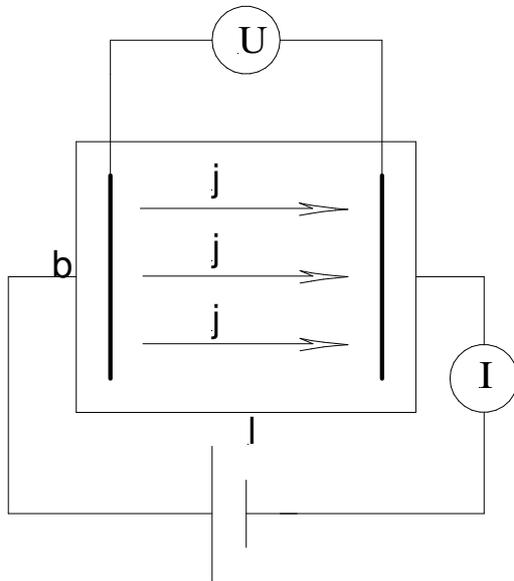


Abbildung 2: Darstellung einer Schichtwiderstandsmessung

### 2.3 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient

Erwärmt sich ein Körper, verändern sich seine Abmessungen. Betrachtet man die Länge des Körpers ist die relative Ausdehnung des Körpers  $(l_2 - l_1)/l_1$  in erster Näherung direkt proportional der Temperaturänderung  $(T_2 - T_1)$ . Dabei ist  $\alpha$  die Proportionalitätskonstante. Bei anisotropen Festkörpern kann auch die Messrichtung einen Einfluss haben. Die Annahme  $\alpha$  sei konstant ist eine Vereinfachung. Die Temperaturabhängigkeit von  $\alpha$  bleibt unberücksichtigt. Es gilt der folgende Zusammenhang [5]:

$$l_2 = l_1 e^{\alpha(T_2 - T_1)} \quad (2.3)$$

Für Berechnungen in der vorliegenden Arbeit genügt folgende Näherung der obigen Formel:

$$\frac{l_2 - l_1}{l_1} = \alpha(T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

$l_1$ ... Länge des Körpers bei der Temperatur  $T_1$

$l_2$ ... Länge des Körpers bei der Temperatur  $T_2$

$\alpha$ ... linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [ $1/^\circ\text{C}$ ]

Bei  $20^\circ\text{C}$  ist der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient für Kupfer  $16,5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  und für Silizium  $2,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  [6].

### 3 Herstellungsprozess einer Standardsiliziumsolarzelle

#### 3.1 Technologie zur Herstellung multikristalliner Wafer

Die folgenden Ausführungen zu den einzelnen Schritten des Herstellungsprozesses einer Zelle beziehen sich auf den momentan meist verbreitetsten Typus von Solarzellen. Hierbei handelt es sich um eine multikristalline Siliziumsolarzelle. Multikristalline Wafer werden in großer Zahl zu meist mit dem Siebdruckverfahren kontaktiert.

Der Ausgangspunkt der Produktionskette jeder Siliziumsolarzelle ist der Rohstoff Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ). Das zweithäufigste Element der Erde nach Sauerstoff ist Silizium.

$\text{SiO}_2$  in der Form von Quarzsand wird in einem Graphittiegel durch einen Lichtbogen aufgeschmolzen. Bei zirka  $1800^\circ\text{C}$  läuft folgender Reduktionsprozess ab [7]:



Das so produzierte sogenannte metallurgische Silizium hat einen Reinheitsgrad von 98%. Weitere Reinigungsprozesse sind notwendig, um die unerwünschten Restverunreinigungen kleiner als  $1:10^{10}$  zu halten. Material dieser Reinheit wird mit „electronic grade“ bezeichnet.

Im ersten Schritt des weltweiten Standardverfahrens für die weitere Reinigung wird feingemahlenes metallurgisches Silizium in einem Sinterofen gasförmigen Chlorwasserstoff ausgesetzt. Es entsteht Trichlorsilan und Wasserstoff [8]:



Das bei unter  $30^\circ\text{C}$  flüssige Trichlorsilan wird vom Wasserstoff getrennt. Ebenso müssen chlorierte Verunreinigungen entfernt werden. Mittels mehrstufiger Destillation wird möglichst reines Trichlorsilan produziert.

Um hochreines Silizium aus Trichlorsilan zu gewinnen wird das CVD-Prinzip (Chemical-Vapor-Deposit) angewandt. Hierfür wird ein dünner Siliziumstab elektrisch auf 1350° C aufgeheizt. Ein Wasserstoff-Trichlorsilangemisch wird ins Reaktorgefäß eingeleitet. An der Oberfläche des Stabes reduziert Trichlorsilan zu Silizium.



Die so entstehenden Stäbe sind bis zu 2m lang und haben einen Durchmesser von bis zu 30cm.

Verfahren zur Herstellung monokristalliner Wafer (Czochalski-Ziehverfahren, Float-Zone Verfahren) sind sehr energieaufwendig und kostenintensiv. Multikristalline Solarzellen sind in der Herstellung billiger. Die Kristalle im Multikristall haben eine Korngröße von einigen mm bis cm. Die Korngrenzen im multikristallinen Wafer sollten möglichst normal zur Oberfläche verlaufen. Zumeist wird das Basismaterial schon bei diesem Schritt in geschmolzenem Zustand dotiert. Bei den p-Typ Zellen mit Bor, bei den weniger häufigen n-Typ Zellen mit Phosphor.

Um einen Siliziumblock mit möglichst langgezogener, faserförmiger Körnung zu schaffen, wird die Technologie der „gerichteten Erstarrung“ (Bridgeman Verfahren) angewandt. Durch genau gesteuerte Abkühlung wachsen im Block lange, dünne Kristallkörner. Diese Kornstruktur reduziert parallel zur Waferoberfläche verlaufende Korngrenzen. Eine multikristalline Siliziumsolarzelle ist quasi eine Parallelschaltung vieler kleiner monokristalliner Zellen bzw. Körner.

Der Block wird in 0,2-0,4 mm dicke Wafer zersägt. Abmessungen aktueller multikristalliner Standardwafer sind 156mm×156mm×0,2mm. Diese sind Ausgangsprodukte für Standardsiliziumsolarzellen.

## 3.2 Technologien zur Herstellung multikristalliner Siliziumsolarzellen

Der Herstellungsprozess einer multikristallinen Industriesolarzelle läuft in folgenden Schritten, die in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben werden, ab [9]:

- Reinigung und Texturierung
- $\text{POCl}_3$  Emitterdiffusion
- Aufbringen einer Antireflexschicht
- Kantenisolation
- Siebdrucken von Front- und Rückkontakte
- Kontaktsintern

## 3.3 Technologien zur Reinigung und Texturierung

Bei der Herstellung der Wafer entstehen beim Zersägen des Siliziumblocks unerwünschte Kristallversetzungen und andere Defekte, der so genannte Sägeschaden. Des Weiteren können sich organische Rückstände vom Sägeprozess auf der Waferoberfläche ablagern. Der Sägeschaden wird nass-chemisch entfernt. [10]

Zur Reinigung und Texturierung der Waferoberfläche und Minimierung des Sägeschadens wird alkalisch in heißer Natronlauge NaOH abgeätzt. Die Ätzrate richtet sich nach der Kristallorientierung, ist also bei multikristallinem Material von Korn zu Korn verschieden. Dadurch entsteht eine schwache anisotrope Textur auf dem Wafer. Es entstehen willkürliche Pyramiden auf der Waferoberfläche. Bei multikristallinen Wafern ist anisotropes Ätzen weniger effizient, da viele Kristalle für eine optisch effektive Pyramiden-Textur unpassend orientiert sind. Eine gute Textur hat den Vorteil, dass die Reflexion der Solarzelle vermindert wird. [11]

Anstelle von NaOH kann auch in wässriger Lösung aus Fluss- und Salpetersäure geätzt werden. Die Oberfläche erhält damit eine isotrope Textur. Dies ist die gängigste Methode. [12]

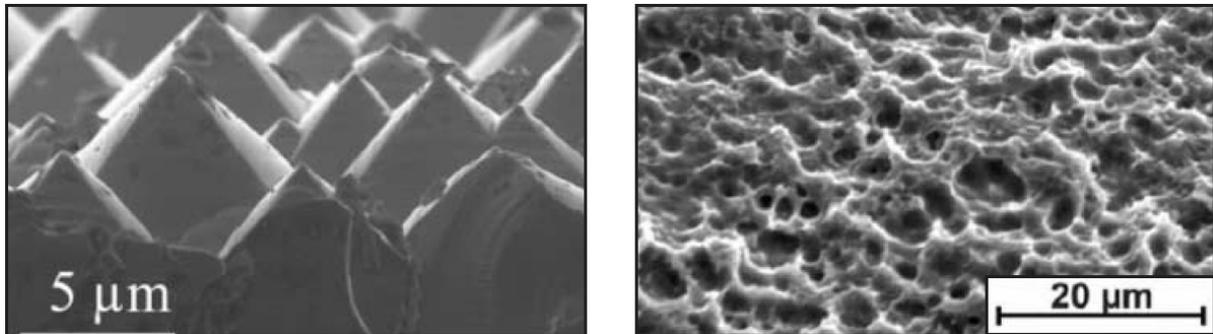


Abbildung 3: Texturierung durch anisotropes Ätzen (links); Texturierung durch isotropes Ätzen (rechts)

Texturierte Zellen koppeln das Licht besser ein, da ein von der Oberfläche reflektierter Strahl unter bestimmten Einfallswinkeln nochmals auf die Zelloberfläche auftreffen kann. Durch die schräge Lichteinkopplung legt das Licht in der Zelle einen längeren Weg zurück. Die Durchstrahlungsverluste werden kleiner. Dies ist besonders bei dünnen Zellen wichtig.

Nach dem Abätzen des Sägeschadens werden metallische Verunreinigungen in einer Salzsäurelösung (HCl) entfernt. Auf die Reinigungs- bzw. Texturierungsschritte folgt eine Spülung mit deionisiertem Wasser. [13] Im nächsten Schritt wird der pn-Übergang erzeugt.

### 3.4 Technologien zur Herstellung des pn-Übergangs

Den kontrollierten Einbau von Fremdatomen in Halbleiter nennt man Dotierung. Die dabei eingebrachten Konzentrationen sind in der Regel sehr gering. Die Fremdatome fungieren als Störstellen im Halbleitermaterial und erhöhen die Leitfähigkeit des Halbleiters.

Der Siliziumkristall bildet das Gitter der Diamantstruktur, das heißt zwei kubisch flächenzentrierte Gitter um ein Viertel der Raumdiagonale zueinander versetzt. Im

reinen Siliziumgitter bildet ein Siliziumatom mit seinen vier Nachbaratomen jeweils eine kovalente Bindung.

Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe. Die Leitfähigkeit des Siliziumkristalls kann durch Dotierung auf zwei Arten erhöht werden:

Man bringt erstens Elemente ins Gitter ein, die ein leicht gebundenes quasi freies Elektron außerhalb des kovalenten Gitters mit sich bringen. Diese dotierten Atome nennt man Donatoren bzw. n-Dotierung. Sie sind Elemente der vierten Hauptgruppe und sind fünfwertig. In Siliziumsolarzellen wird hauptsächlich mit Phosphor n-dotiert.

Man bringt zweitens Elemente ins Gitter ein, die einen unbesetzten Zustand quasi eine Fehlstelle ein sogenanntes Loch ins Gitter mit sich bringen. Diese dotierten Atome nennt man Akzeptoren bzw. p-Dotierung. Sie sind Elemente der dritten Hauptgruppe. In Siliziumsolarzellen wird hauptsächlich mit Bor p-dotiert.

Durch die mit der Dotierung eingebrachten Ladungsträger verschiebt sich das Fermi-niveau des Halbleiters, n-Dotierung hebt es p-Dotierung senkt es. Liegt ein pn-Übergang vor, gleichen sich die Fermi-niveaus einander an (siehe Abbildung 4). Es entsteht eine Raumladungszone.

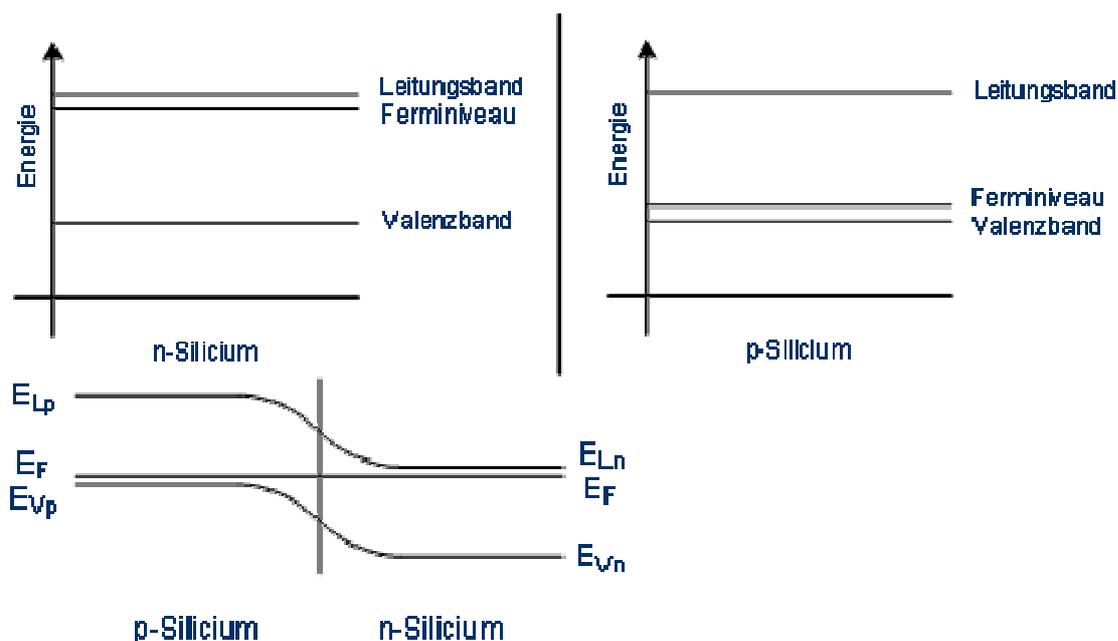


Abbildung 4: Darstellung Bändermodell n-Leiter(links oben); Darstellung Bändermodell

*p-Leiter (rechts oben); Darstellung eines pn-Übergangs (unten) [14]*

Es gibt verschiedene Dotierungsverfahren wie beispielsweise Diffusion, Ionenimplantation und Legierung. Das dominierende Verfahren in der Photovoltaik ist die Diffusion. Die Eindiffusion von festen Stoffen in das Siliziumgitter gehorcht dem zweiten Fick'schen Gesetz:

$$\frac{dN(x,t)}{dt} = D \frac{d^2N(x,t)}{dx^2} \quad (3.4)$$

$N(x,t)$  ...Konzentration der zu diffundierenden Stoffe an der Stelle  $x$  zur Zeit  $t$

$D$  ...der materialspezifische Diffusionskoeffizient, der stark von der Temperatur abhängt

Die Diffusion findet im Wesentlichen nach zwei verschiedenen Prinzipien statt. Die zu diffundierenden Stoffe können sich über Zwischengitterplätze oder über Leerstellen bewegen. Die Diffusion ist in beiden Fällen stark temperaturabhängig. Die angestrebten Diffusionstemperaturen reichen in der Photovoltaik von 800° C bis 1200°C. Bei allen Produktionsverfahren gilt, dass die Dotierung mit Bor schon bei der Herstellung der Blöcke beziehungsweise Stäbe vorgenommen wird. Die frontseitige n-Dotierung einer Zelle wird durch Gasdiffusionsverfahren mit Phosphin (PH) oder Phosphoroxychlorid ( $\text{POCl}_3$ ) erzeugt. An der Zelloberfläche entsteht eine sehr dünne Phosphorsilicatglasschicht, die später abgeätzt wird und als Diffusionsquelle wirkt. Es entsteht eine Emitterschicht von ca. 1µm. [15]

Zusätzlich zur Borgrunddotierung der Basis wird durch p-Dotierung der Rückseite ein p-p<sup>+</sup>-Übergang, der auch Back-Surface-Field kurz BSF genannt wird, erzeugt. Durch die vollflächige Rückseitenmetallisierung einer Zelle entstehen Leistungsverluste durch Rekombination von Minoritätsladungsträger. Um weniger Elektronen durch Oberflächenrekombination zu verlieren, hält die p<sup>+</sup>-Dotierung, die Konzentration der Elektronen niedrig. Damit verringert sich ihre Rekombinationsrate. [16]

Die Rückseitenkontaktierung einer Zelle wird vollflächig in Form von Aluminiumleitpaste aufgedruckt und danach eingesintert. Das Aluminium der Paste erzeugt beim Sintern die p<sup>+</sup>-Dotierung. Es folgen weitere verfeinernde Schritte zur Leistungssteigerung.

### 3.5 Technologien zur Herstellung einer Antireflexschicht, zur Oberflächenpassivierung und Kantenisolierung

Ein wesentlicher Prozessschritt bei der Herstellung von kristallinen Siliziumsolarzellen ist deren Beschichtung mit einer Antireflex- und Passivierungsschicht. Im Vakuum mittels PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) bei zirka 350°C abgeschiedene Siliziumnitrid-Schichten (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) eignen sich sowohl als Antireflexschicht als auch für die Oberflächenpassivierung von Silizium-Solarzellen. Die zur Minimierung der Reflexion der nutzbaren Photonen notwendige Schichtdicke beträgt 70 nm. [17] Reaktionsgase für die Abscheidung sind Silan (SiH<sub>4</sub>) und Ammoniak(NH<sub>3</sub>). Die Reaktionsgleichung lautet:



Durch die Absättigung der Störstellen bzw. Rekombinationszentren dient Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> als Passivierungsschicht. Andererseits bewirkt die Schicht auch eine sogenannte Feldeffektpassivierung durch Einbringung fester positiver Ladungen, die Löcher als Rekombinationspartner für Elektronen von der Oberfläche abstößt. Die Schicht verringert durch beide Funktionen die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit.

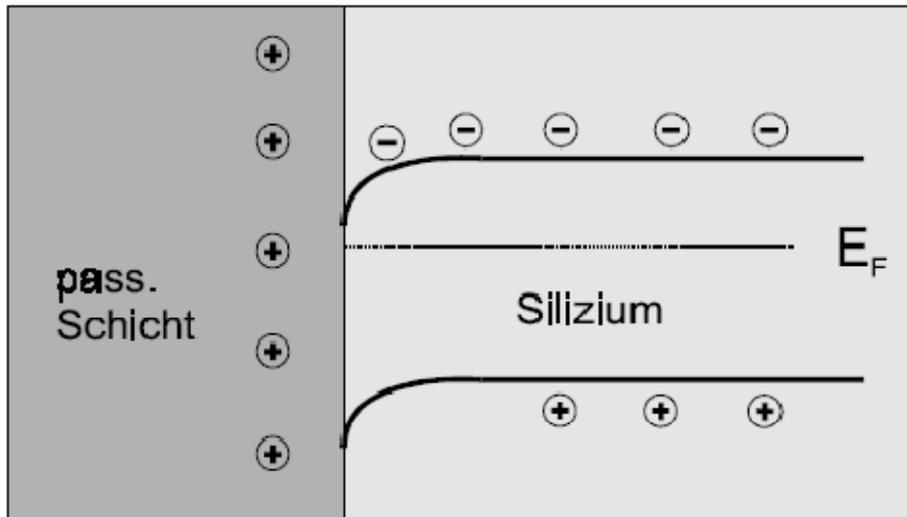


Abbildung 5: Feldeffektpassivierung durch feste Ladungen in der Passivierungsschicht. An der Siliziumoberfläche tritt eine Bandverbiegung auf [18]

Es kann auch eine Siliziumoxidschicht zur Passivierung aufgebracht werden.

Als Antireflexschicht hat die Siliziumnitridschicht bei einem Brechungsindex  $n$  von 2 und einer Dicke von 70nm ein Reflexionsminimum bei einer Wellenlänge von 600nm. Dies zeigt sich deutlich sichtbar in einer bläulichen Färbung der beschichteten Zellen im Vergleich zur silbrigen Färbung des unbeschichteten Wafers. [17]

Um Kurzschlüsse zu verhindern, muss der Emitter vom BSF und den Rückkontakten getrennt werden. Hierfür gibt es verschiedene Verfahren wie Ätzen, Sägen der Kanten oder auch Ritzen eines Grabens mittels eines Lasers, die an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Herstellungsprozesses zur Anwendung kommen. Es folgt die Kontaktierung welche auch Thema der vorliegenden Arbeit ist.

### 3.6 Technologien zur Kontaktierung einer Siliziumsolarzelle

Die Kontakte der Solarzelle werden im Siebdruckverfahren hergestellt. Die Vorteile des Siebdruckverfahrens liegen in der relativ einfachen Automatisierbarkeit und den dadurch geringen Investitionskosten. [19] Vorderseitig wird aufgrund der ausgezeichneten Leitfähigkeit ausschließlich Silbersinterleitpaste verwendet. Da einerseits rückseitig vollflächig kontaktiert werden kann, verwendet man hier hauptsächlich die relativ billige Aluminiumsinterleitpaste. Andererseits benötigt man Aluminium für das Back-Surface-Field. Ausgenommen sind auf der Rückseite zwei Bars, die mit

Silbersinterleitpaste kontaktiert werden, da darauf die Busse für die weitere Verschaltung verlötet werden. Es lässt sich auf Aluminium aufgrund seiner Oxidschicht an der Oberfläche kein haftender Lötkontakt anbringen.

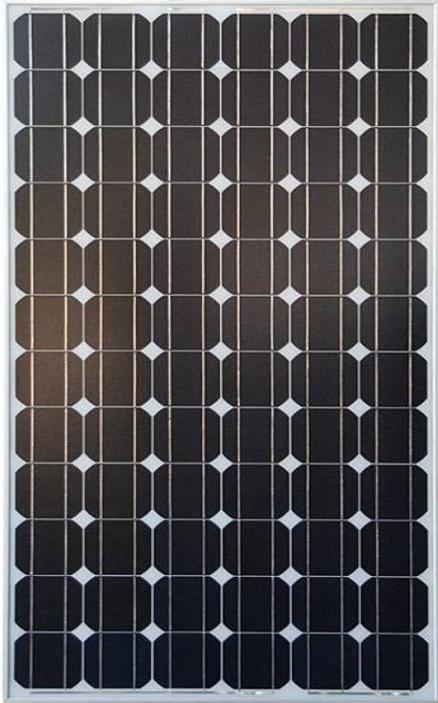
Vorderseitig wird ein Fingergrid aus vielen parallelen dünnen Fingern gedruckt, die zu zwei Busbars leiten. Die Busbars stehen normal zu den Fingern und parallel zu einander. Ein Bus halbiert jeweils eine Hälfte einer Zelle der Länge nach. Vorder- und Rückseitenbusse sind in der Aufsicht einander deckungsgleich.



*Abbildung 6: Kontaktierungsmuster einer multikristallinen Siliziumsolarzelle*

Nach dem Druckvorgang einer Seite wird die Paste jeweils bei zirka 200°C getrocknet. Gesintert wird 1-2 min bei zirka 700°C. Die Silbersinterpaste durchdringt dabei die Antireflexschicht der Vorderseite.

Die einzelnen Zellen sind in einem Modul in Serie geschaltet. Die Busse der Frontseite einer Zelle führen zur Rückseite der nächsten Zelle. Eine einzelne abgeschattete Zelle wirkt wie eine Diode in Sperrrichtung und minimiert die Gesamtleistung beträchtlich. Die Zellen werden in Modulen auf Glasscheiben laminiert.



*Abbildung 7: Typisches Solarzellenmodul [20]*

## **4 Moderne Kontaktierungsmethoden**

Im Bereich der Photovoltaik wird sowohl universitär als auch privatwirtschaftlich intensiv geforscht. Die vorliegende Arbeit präsentiert eine neue Kontaktierungsmethode für Siliziumsolarzellen. Abschattungsverluste und Ohmsche Verluste auf der Vorderseite einer typischen Si-Solarzelle machen in etwa 10% der verfügbaren Leistung aus (Verlustmechanismen siehe Kapitel 6). Diese Verluste auch nur um einen Bruchteil zu verringern hat direkte Konsequenzen für die ökonomische Bereitstellung von photovoltaischem Strom. Hier existieren verschiedenste Ansätze, das übliche Kontaktierungsverfahren in Bezug auf Effizienz zu verbessern. Einige andere innovative Methoden sollen in folgenden Unterkapiteln vorgestellt werden.

### **4.1 Buried Contact Zellen**

In den Bereich hoch effizienter Siliziumsolarzellen fällt die Buried Contact Zelle.

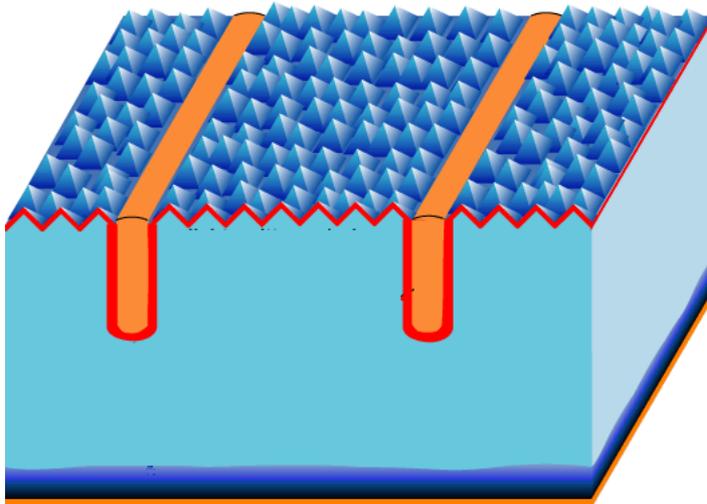


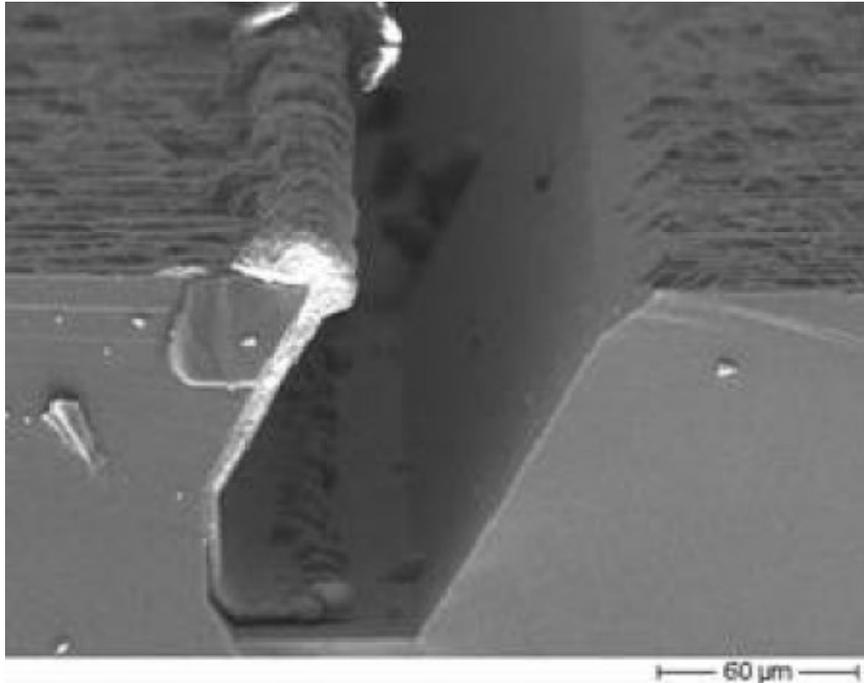
Abbildung 8: Buried Contact Zelle [21]

Mittels Lasertechnik werden zirka  $20\mu\text{m}$  breite und bis zu  $100\mu\text{m}$  tiefe Gräben in eine texturierte Siliziumsolarzelle geschnitten. Die Gräben werden mit Kontaktiermaterial gefüllt und verdrahten somit den Emitter. Der Vorteil liegt in der geringeren Abschattung der Zelle durch versenkte Kontakte. Durch ein Höhen zu Breiten Verhältnis des Fingerquerschnittes von bis zu 5:1 verringern sich die Widerstandsverluste trotz geringer Abschattung. Bei einfach bedruckten gesinterten Fingern ist eine Höhe von zirka  $15\mu\text{m}$  bei  $120\mu\text{m}$  üblich. Man erreicht Flächenabschattungswerte von unter 3%, wobei bei Standardzellen zirka 6% üblich sind. In die Gräben wird zuerst stromlos Nickel abgeschieden. Erst nach dem Sintern werden die Nickelkontakte mit Kupfer galvanisch verstärkt, da sich Kupfer nicht direkt auf dem Wafer abscheiden lässt. In den Gräben wird der Emitter in einer zweiten Dotierungsstufe zusätzlich  $n^{++}$ -hochdotiert. [22]

Kommerzielle Zellen mit Buried Contacts wie die Saturn Zelle von BP-Solar erreichen bis zu 18% Wirkungsgrad. Im Labor wurden bis zu 21% erreicht.

### 4.1.1 Angled Buried Contact Zellen

Eine Weiterentwicklung dieser Methode sind Angled Buried Contacts. Hier werden die Gräben schräg angelegt und nicht voll aufgefüllt. So sind im Prinzip theoretisch 0% Flächenabschattung durch die Kontaktierung möglich.



*Abbildung 9: Angled Buried Contact Zelle. Der stromlos abgeschiedene Nickel-Kupfer Kontakt liegt großteils im abgeschatteten Bereich vergraben und schattet somit nur wenig zusätzlich ab [22]*

## 4.1.2 Screen Printed Laser Grooved Buried Contact Solar Zellen

Einen weiteren Ansatz stellen die Screen Printed Laser Grooved Buried Contact Solar Cells (SPBCSCs) dar. Bei SPBCSCs werden Gräben mit speziell auf Siebdruck ausgelegten Kontakten mit Lasertechnologie geschnitten. Auch hier werden die Gräben hochdotiert. Gefüllt werden diese nicht durch Nickel-Kupfer Abscheidung, sondern mittels Siebdruck. Mit einer Kombination der aus Siebdrucktechnologie und der Buried Contact Technologie geht man einen Mittelweg zwischen dem relativ kostenintensiven standardmäßigen Siebdruck und der highend Buried Contact Technologie.

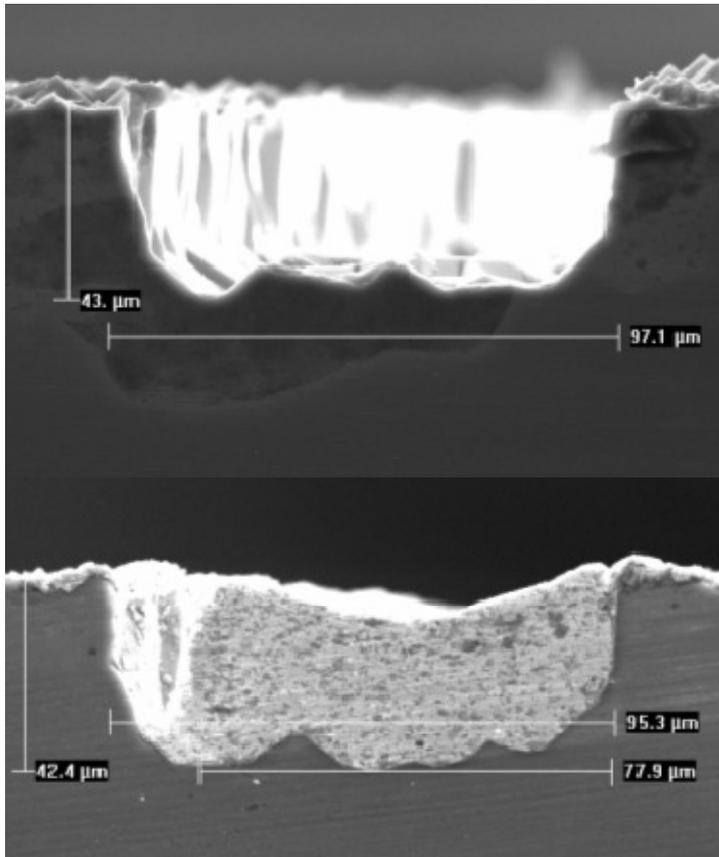


Abbildung 10: Mittels Laser erzeugter, leerer Graben (oben); siebbedruckter gefüllter Graben (unten) [23]

### 4.1.3 Mehrfach bedruckte Zellen mit hohem Querschnittsverhältnis

Bei den Fingern des Frontkontakts einer Siliziumsolarzelle ist ein besonders großes Höhen zu Breiten Verhältnis des Querschnittes vorteilhaft. Höhere Finger verringern die Widerstandsverluste bzw. ermöglichen dadurch die Planung schmalerer Finger mit verringerten Abschattungsverlusten. Begrenzt wird die maximal erreichbare Fingerhöhe einerseits durch die Fingerbreite. Andererseits verläuft die Paste nach dem Bedrucken und die Schicht verliert dabei an Höhe.

Durch Verwendung eines feinen engmaschigen Siebes beim Druck lassen sich dünnere Finger auftragen. Nach dem Trocknen der Paste ist es bei genauer optischer Kalibrierung möglich, den Finger nochmals zu bedrucken. Durch die Höhe der weiteren Schicht wird ein günstigeres Querschnittsverhältnis als bei einfacher Bedruckung erreicht. Bei zehn Druck-Trocken Zyklen können beispielsweise  $60\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$  Finger hergestellt werden. [24]

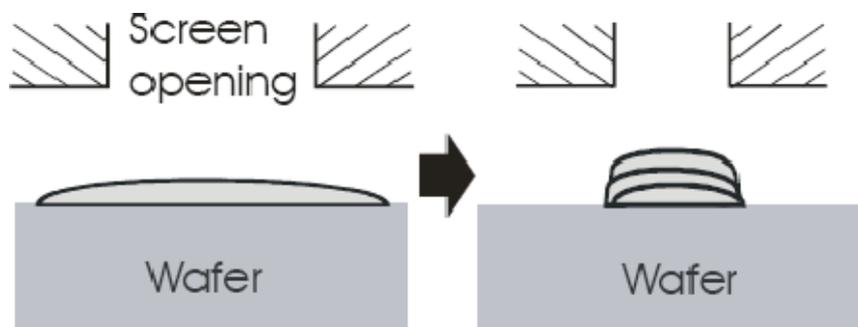


Abbildung 11: Standard Siebdruck (links); Dreischichtiger Siebdruck (rechts) [24]

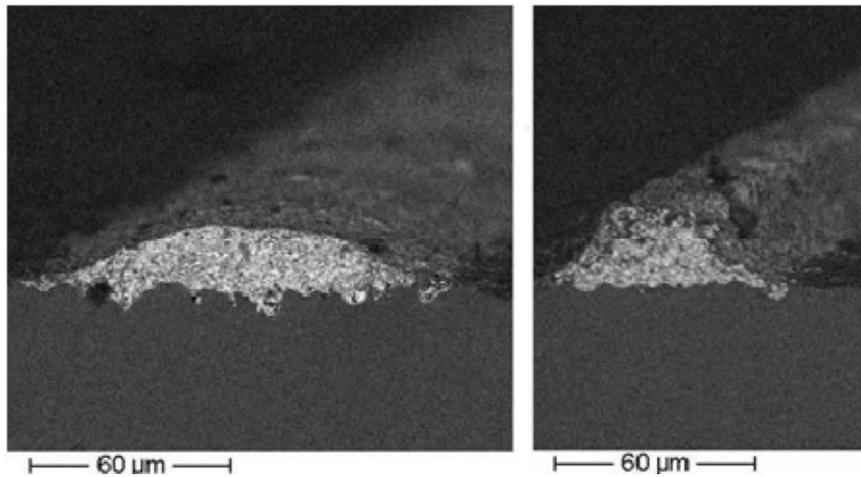


Abbildung 12: Standard Finger einfach bedruckt ( $15\mu\text{m}\times 120\mu\text{m}$ ) (links); dreifach bedruckter Finger ( $60\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$ ) (rechts) [24]

## 4.2 Metal-Wrap-through und Emitter-Wrap-through Zellen

Ein Basiskonzept zur Abschattungsreduzierung besteht darin die abschattenden Kontakte soweit wie möglich auf die Rückseite zu legen. Zwei Technologien solcher Back Contact Zellen sind Metal-Wrap-through (MWT) und Emitter-Wrap-through (EWT) Zellen. Bei beiden Prinzipien wird die Zelle mittels Laser an vielen Stellen perforiert. Bei MWTs wird die kontaktierende Metallisierung durch diese Löcher auf die Rückseite zur weiteren Kontaktierung geführt, somit verringert sich die Abschattung. Das Kontaktierungsmuster ist dabei sternförmig um die Löcher angeordnet. Dies reduziert die Abschattungsverluste der Vorderseite um etwa 3% [25].

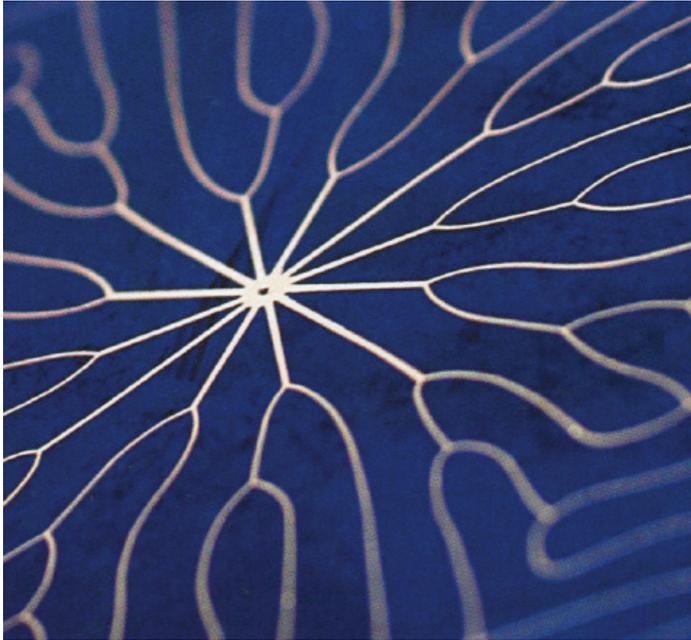


Abbildung 13: Das sternförmige Kontaktierungsmuster führt die Kontakte durch die Löcher auf die Rückseite [26]

Bei EWTs wird gänzlich auf die Metallisierung verzichtet und der Emitter durch die Löcher auf die Rückseite geführt. Dieses Verfahren wird für monokristalline Zellen verwendet. Hier wird eine Effizienz von etwa 18% erreicht. [27]

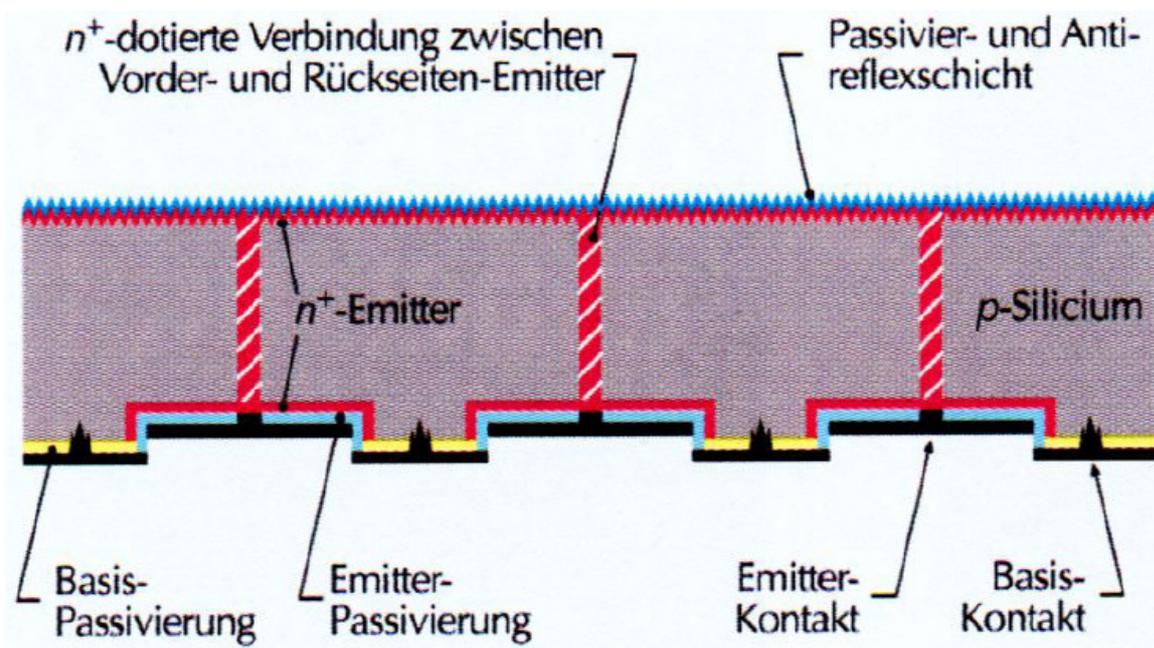


Abbildung 14: Schematische Darstellung einer EWT Zelle [26]

### 4.3 Galvanisierte Metallisierung

Die Firma Suntech bringt die frontseitige Kontaktierung nicht wie üblich durch Siebdruck sondern galvanisch auf. Dies ermöglicht dabei dünnere Kontakte und ermöglicht ein engeres Fingergrid. Man erreicht hier insgesamt Leistungssteigerungen von bis zu 12% im Vergleich zum Siebdruck. [28]

### 4.4 Innovative Zelle der Firma Day4Energy

Üblicherweise wird der Strom der einzelnen Finger in zwei Bussen gesammelt. Die Busse bestehen aus zwei Kupferbändern, welche auf aufgesinterte Busbars aus Silbersinterpaste vollständig verlötet werden. Die Kupferbänder stellen im Modul den Serienkontakt zu einer Nachbarzelle her. Day4Energy verzichtet sowohl auf Busse und aufgesinterte Busbars.

An deren Stelle treten viele dünne Kupferfeindrähte, die Bussen gleich normal zu den Fingern stehen. Sie sind punktweise mit den Fingern an den Kreuzungspunkten verlötet und stellen anstelle von Bussen den Serienkontakt zur Rückseite einer Nachbarzelle im Modul her. Mit niedrigschmelzendem Lot ist jeder Feindraht stark eigenverzinnt. Zum Verlöten reicht die Temperatur beim Laminieren in der Modulfertigung aus. Dies geschieht ohne zusätzliches Zinn und Arbeitsschritte beiläufig. Die Technologie ist simpel und daher kostengünstig. Leistungssteigerungen gegenüber dem Standardverfahren beruhen laut eigenen Angaben Day4Energies auf reduzierten Abschattungs- und Ohmschen Verlusten. Es wird die Abschattung der zwei Busse durch die vieler kleiner Kupferfeindrähte ersetzt. Die Ohmschen Verluste in den Sinterfingern sinken drastisch, da Strom in den Fingern zum nächsten Kontaktpunkt mit dem Draht nur über eine relativ kurze Strecke fließt. [29]



*Abbildung 15: Day4Energy Zelle; Das Gitter wird von Fingern und Drähten aufgespannt  
[30]*

## 5 Die Versuchszelle

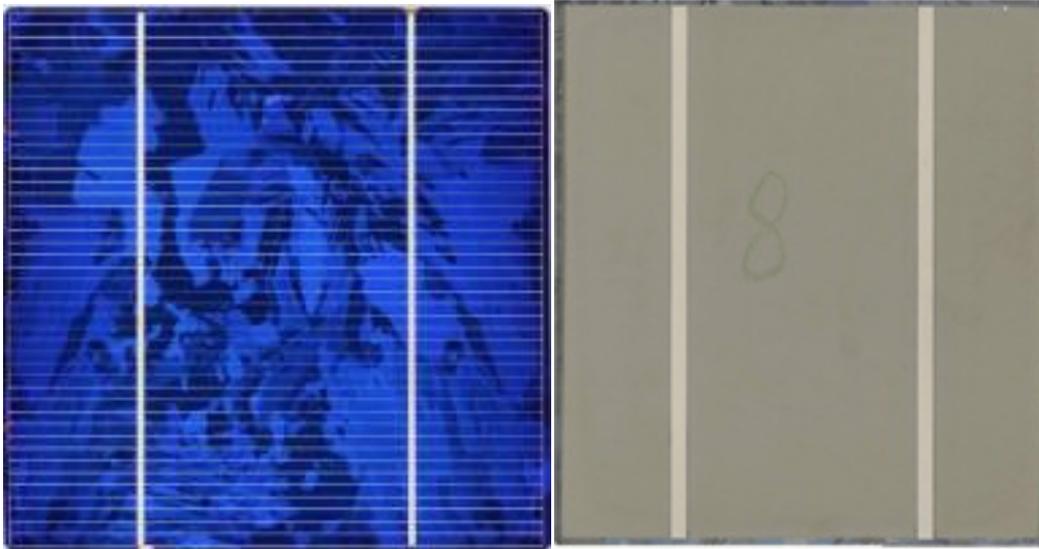


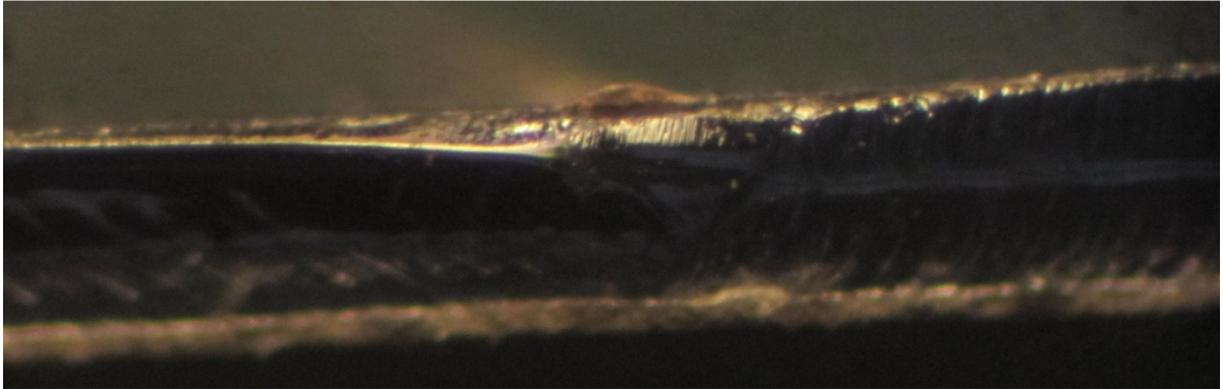
Abbildung 16: Vorder- und Rückseite der Testzelle

Für sämtliche Vorversuche, Tests und Versuchsreihen standen zirka sechzig der abgebildeten Zelle baugleicher Zellen zur Verfügung. Es handelt sich um ein älteres Fabrikat der Firma Q-Cells. Das Format ist  $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ . Derzeit aktuelle kommerziell erwerbliche Zellen haben bereits ein größeres Format von  $156\text{mm} \times 156\text{mm}$ .

In sonstiger Hinsicht repräsentiert die Testzelle den Typus der am häufigsten verkauften multikristallinen Siliziumsolarzellen, die nicht in den High End Sektor fällt. Die blaue Färbung der Vorderseite ist die für Standardzellen typische Siliziumnitridschicht. Sie erfüllt eine Doppelfunktion als Antireflex- und Passivierungsschicht. Die n-Schicht ist mit Phosphor als Donator dotiert. Als Akzeptor für die p-Dotierung dient Bor.

Mit dem Siebdruckverfahren wird das Kontaktierungsmaterial aufgetragen und danach eingesintert. Die vordere Kontaktierung besteht aus Silbersinterpaste im üblichen Fingergrid mit zwei Bussen. Rückseitig wird bis auf zwei Busbars, die mit Silbersinterpaste aufgebracht werden, vollflächig mit relativ preislich günstiger Alusinterpaste kontaktiert. Die Alusinterschicht erfüllt eine Doppelfunktion als Kontaktierung und Back-Surface-Field.

Die Zelldicke beträgt nach eigener Vermessung  $220\mu\text{m}$ . Das Fingergrid besteht aus 57 zueinander parallelen äquidistanten Fingern. Das entspricht einem Fingerabstand von  $2,63\text{mm}$ . Die Fingerbreite beträgt zirka  $160\mu\text{m}$ . Als Fingerschichthöhe wird  $15\mu\text{m}$  angenommen. Dies entspricht einfach bedruckten Fingern. Die gleiche Dicke wird für die gesinterten Busbars angenommen. Die Breite der Busbars beträgt  $2,5\text{mm}$ .



*Abbildung 17: Querschnitt einer Standardzelle*

## 6 Verlustmechanismen

### 6.1 Verluste einer Siliziumsolarzelle bezogen auf das Bandgap

Ein Teil der Verluste einer Siliziumsolarzelle sind prinzipieller Natur und beziehen sich auf das Bandgap von Silizium von 1,12eV. Diese würden selbst bei idealisierten Solarzellen auftreten. Photonen mit geringerer Energie können im Siliziumkristall kein Elektronen-Lochpaar generieren. Bezogen auf das Sonnenspektrum von AM 1 können somit 25,16% der eingestrahlten Leistung nicht in elektrische Energie umgewandelt werden.

Elektronen, die von Photonen mit Energien angeregt werden, besetzen energetisch höhere Zustände im Leitungsband. Der 1,12eV übersteigende Energiebetrag wird von den angeregten Elektronen im Leitungsband thermisch abgegeben und kann nicht in elektrische Energie umgesetzt werden. Bezogen auf das Sonnenspektrum von AM 1 können somit 56,50% der eingestrahlten Leistung nicht in elektrische Energie umgewandelt werden. [31]

Bei AM1 kann der Wirkungsgrad von Siliziumsolarzellen durch das Bandgap bedingt einen Wert von 44,50% nicht übersteigen. Weiter limitiert ist die Effizienz aufgrund des Charakters von Fermigas. Limits hierfür wurden von Shockley und Queisser anhand eines detaillierten Gleichgewichts für mikroskopische Prozesse aufgestellt. Dabei gehen sie im thermodynamischen Gleichgewicht von einer detaillierten Bilanz für Prozeß und Umkehrprozeß bzw. Photoeffekt und strahlender Rekombination aus. [32]

## 6.2 Verluste einer realen Siliziumsolarzelle

Schematisch lassen sich die nicht prinzipiellen Verluste einer realen Siliziumsolarzelle, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, einteilen.

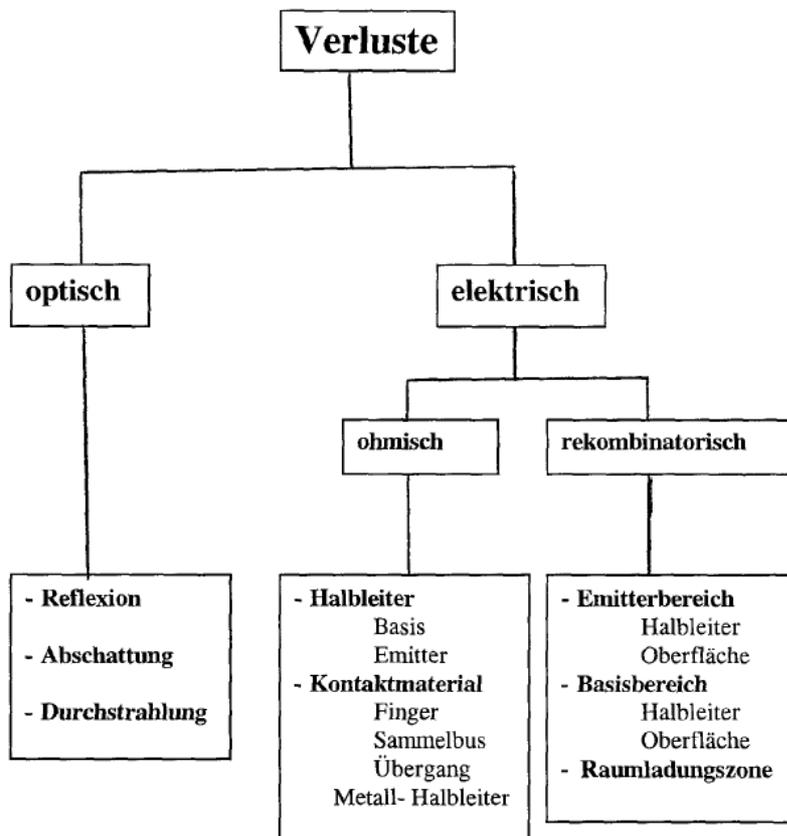


Abbildung 18: Überblick der Verlustmechanismen einer realen Siliziumsolarzelle [33]

### 6.2.1 Elektrische Verluste

#### 6.2.1.1 Rekombinatorische Verluste

Rekombination einer realen Solarzelle teilt sich in Störstellenrekombination, Augerrekombination und Strahlende Rekombination.

Die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit  $S_n$  ist ein Maß für die Rekombination an der Oberfläche. Die Diffusionslänge  $L_n$  der Ladungsträger definiert den mittleren Abstand, den ein Ladungsträger von seinem Ort der Generation bis zur Rekombination zurücklegt.

Für die Rekombination in der Basis und die Rekombinationsgeschwindigkeit an der Zellrückseite gilt folgendes. Übersteigt die Diffusionslänge die doppelte Zelldicke erreicht der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit der Diffusionslänge einen Sättigungswert. Der Sättigungswert steigt mit sinkender Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit. Die Leerlaufspannung steigt ebenfalls mit sinkender Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit. Sie erreicht jedoch keinen Sättigungswert in Abhängigkeit der Diffusionslänge. Es werden durch die Oberflächenrekombination Elektronen-Lochpaare vernichtet.

Die Ursachen der Rekombinationsverluste im Emitter und in der Raumladungszone sind komplexer.

Allgemein sind die Rekombinationsverlustmechanismen von der Diffusionslänge der Minoritätsladungsträger, der Anzahl und Energie der Fehlstellenniveaus, den Dotierkonzentrationen und der Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit ab. Durch ein Back Surface Field und Passivierung lässt sich die Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit verringern. [33]

### **6.2.1.2 Ohmsche Verluste**

Ohmsche Verluste einer Solarzelle teilen sich in serielle und parallele Widerstände. Es können Kriechströme an den Kanten der Zelle auftreten. Punktuelle Störungen des pn-Übergangs z.B. durch Eindiffusion von Fremdkörpern treten ebenfalls oft auf. Unpassende oder unpräzise Parameter beim Einbrennen der Sinterpaste emitterseitig sind ebenfalls Verlustquellen. In solchen Fällen treten beim Einbrennen auch Kurzschlüsse auf, da die sehr dünne Emitterschicht leicht durchsintert wird.

Die folgende Abbildung stellt die seriellen Verluste in einer Zelle dar.

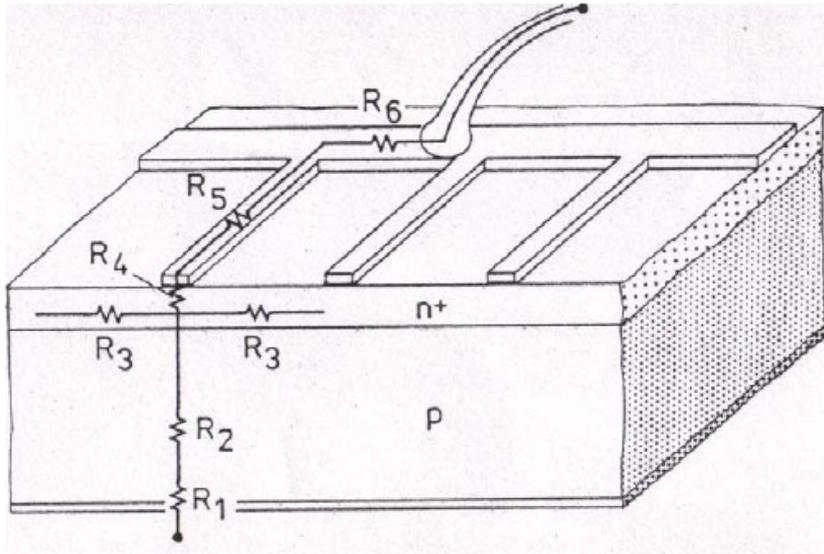


Abbildung 19: Ohmsche serielle Verluste einer Zelle [34]

$R_1$ ...Widerstand des Gesamten Metall-Halbleiter Kontakts der gesamten Rückseite

$R_2$ ...Widerstand der Basis

$R_3$ ...Widerstand im Emitter zwischen den Fingern aufgrund des Schichtwiderstandes des Emitters

$R_4$ ...Widerstand des Metall-Halbleiter Kontakts unter einem Finger

$R_5$ ...Widerstand eines Gitterfingers

$R_6$ ...Widerstand eines Busses

$R_1$  und  $R_4$  sind die Kontaktwiderstände zwischen Sinterkontakt und Wafer.  $R_1$  ist der Widerstand des Metall-Halbleiterkontakts von Aluminium zu Silizium.  $R_4$  ist der Widerstand des Metall-Halbleiterkontakts von Silber zu Silizium.

### 6.2.1.3 Schottky Kontakt und Ohmscher Kontakt

Metall-Halbleiterkontakte können als Schottky oder als Ohmsche Kontakte ausgebildet sein.

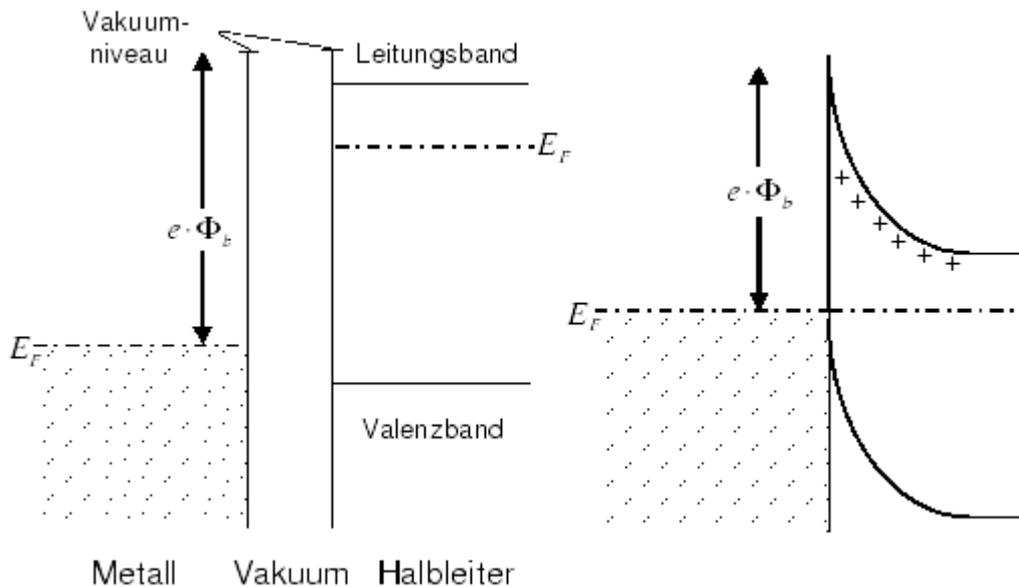


Abbildung 20: Barriere zwischen einem Metall und einem n-Halbleiter; vor der Kontaktierung (links); nach der Kontaktierung (rechts) [35]

Beim Zusammenfügen eines Metalls mit dem Halbleiter kommt es zum Ladungsausgleich. Die Fermi-Energie beider Materialien stellen sich auf ein gemeinsames gleiches Niveau ein. Es kommt dadurch zum Verbiegen der Bänder des Halbleiters. Eine Potenzialbarriere bildet sich durch den Diffusionsstrom der Leitungsbandelektronen aus dem n-Halbleiter ins Metall. Ein gleichrichtender Übergang mit der Barrierehöhe  $e \cdot \Phi_b$  entsteht. Ist hingegen die Austrittsarbeit des Metalls kleiner, entsteht ein echter Ohmscher Kontakt.

Für einen Metall p-Leiter Kontakt verhält es sich genau umgekehrt. Ist die Austrittsarbeit des Metalls größer als die des p-Leiters, entsteht Ohmscher Kontakt anderenfalls einer mit gleichrichtendem Charakter.

Für einen n-Halbleiter gilt:

$$e\Phi_b = e(\Phi_m - X_s) \quad (6.1)$$

Für einen p-Halbleiter gilt:

$$e\Phi_b = E_g - e(\Phi_m - X_s) \quad (6.2)$$

Wobei für Elektronen gilt:

$e\Phi_b$ ...Barrierehöhe des Metall- Halbleiterkontakts

$e\Phi_m$ ...Austrittsarbeit des Metalls

$eX_s$ ...Energiedifferenz zwischen der Bandkante des Leitungsbands des Halbleiters und des Vakuumniveaus

$E_g$ ...Energie des Halbleitergaps

Allein unter dem Aspekt der sehr kleinen Austrittsarbeit würde sich Aluminium (4,2eV [36]) schlecht als Kontaktmaterial zu einem p-Halbleiter (errechnet sich zu 4,74 eV bezogen auf das Fermi-niveau eines typischen mit Bor dotierten p-Leiter als Differenz zum Vakuumniveau) eignen. Es ergäbe sich ein unerwünschter, stark gleichrichtender Kontakt. Jedoch existieren zwei Effekte die einem Metall-Halbleiterkontakt Ohmschen Charakter verleihen.

Im Fall von Aluminium dringt dieses beim Sintern ins p-Silizium ein und bewirkt dadurch eine sehr starke p-Dotierung nahe der Oberfläche. Es bildet sich eine hohe aber nur schmale Barriere aus. Diese kann durchtunnelt werden. Aufgrund des Tunneleffekts nimmt der Kontaktwiderstand mit zunehmender Dotierkonzentration ab. Mit zunehmender Dotierkonzentration schmälert sich die Potentialbarriere.

Zum Zweiten können niedrige Barrieren durch Thermoionisation überwunden werden. Der Kontaktwiderstand hängt dabei von der Barrierehöhe ab.

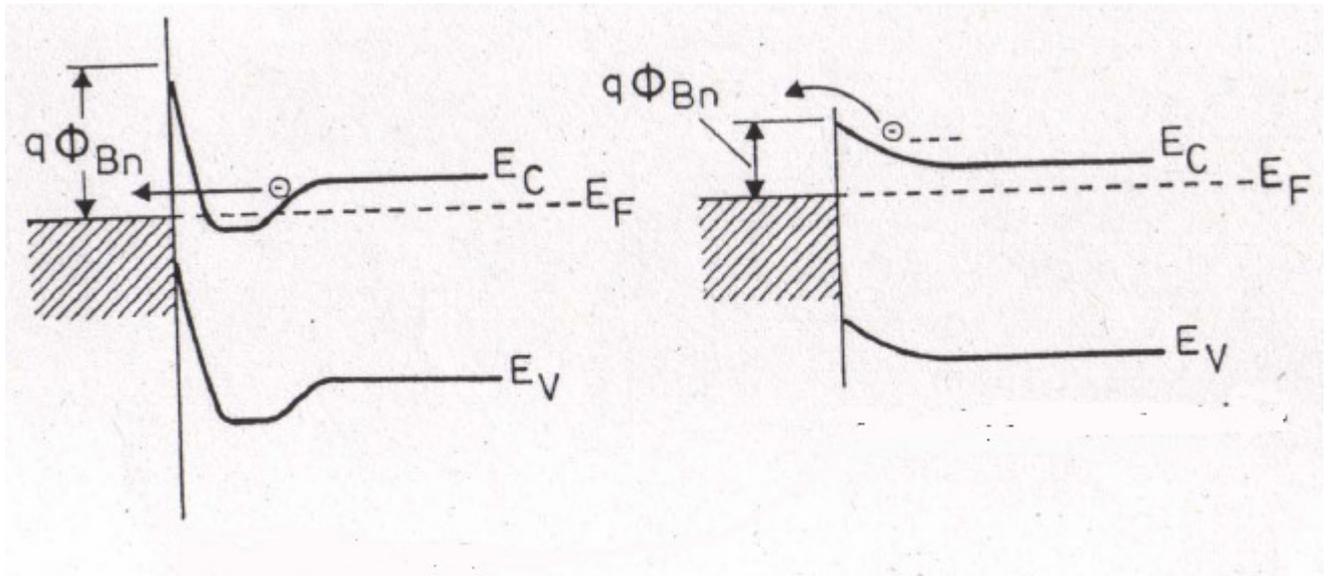


Abbildung 21: Darstellung der Kontaktwiderstandsherabsetzung durch den Tunneleffekt (rechts); Darstellung der Kontaktwiderstandsherabsetzung durch Thermoionisation (links) [37]

Für die vollflächig kontaktierte Rückseite lässt sich der Widerstand  $R_1$  (Abbildung 19) wie folgt berechnen. Es gilt die Annahme eines sehr kleinen Schichtwiderstandes der Alusinterpastenschicht gegenüber des Schichtwiderstandes der Basis.

$$R_1 = \frac{\rho_c}{l \cdot b} \quad (6.3)$$

Wobei gilt:

$R_1$  ... Kontaktwiderstand zwischen Rückseitenkontaktierung und Wafer

$\rho_c$  ... spezifischer Kontaktwiderstand [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]

$l$  ... Länge des Wafers

$b$  ... Breite des Wafers

$R_2$  ist der serielle Widerstand in der Basis. Er ergibt sich zu:

$$R_2 = \rho * D * A \quad (6.4)$$

Wobei gilt:

$R_2$ ...serieller Widerstand der Basis

$\rho$ ...spezifischer Widerstand der Basis

D...Waferdicke (vernachlässigt wird hierbei die sehr dünne Emitterschicht)

A...Waferfläche

In den meisten Fällen sind die Verluste durch den seriellen Widerstand der Basis vernachlässigbar.

Aufgrund des vorhandenen Emitterschichtwiderstands, der nicht vollflächigen Kontaktierung der Vorderseite und der endlichen Fingerbreite ergibt sich ein abfallender Spannungsverlauf zur Mitte des Fingers hin. Der genaue Wert von  $R_4$  bedarf eingehender Berechnung.

$R_3$ ,  $R_5$  und  $R_6$  aus Abbildung 19 werden im Kapitel 8 genauer erläutert.

## 6.2.2 Optische Verluste

Die Oberfläche eines unbeschichteten Siliziumwafers reflektiert bei senkrechter Einstrahlung je nach Wellenlänge zwischen 35% und 50% des eintreffenden Lichtes [38]. Der komplexe Brechungsindex ist hierbei von der Wellenlänge des eintreffenden Lichtstrahls abhängig. Die Feldstärke im Inneren des Kristalls stellt sich wie folgt dar:

$$E = E_0 \cos\left(\frac{\omega}{c}nx - \omega t\right)e^{-\frac{\omega}{c}kx} \quad (6.4)$$

n...Realteil des Brechungsindex

k...Imaginärteil des Brechungsindex

Der Exponentialteil stellt hierbei die Dämpfung, der Cosinus die schwingende Welle. [39]

Eine Verbesserung bringt eine Antireflexschicht aus Siliziumnitrid  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oder Titandioxid  $\text{TiO}_2$ . Die Schichtdicke der Antireflexschicht ist  $\lambda/4$  der Wellenlänge des gewünschten Reflexionsminimas. Es tritt ein Phasensprung von  $\Pi/2$  beim Eintreten von Licht ins optisch dichtere Medium auf. Durch Phasensprung und Weglängenunterschied löschen sich der an der Antireflexschicht reflektierte und der am Silizium reflektierte Strahl aus.

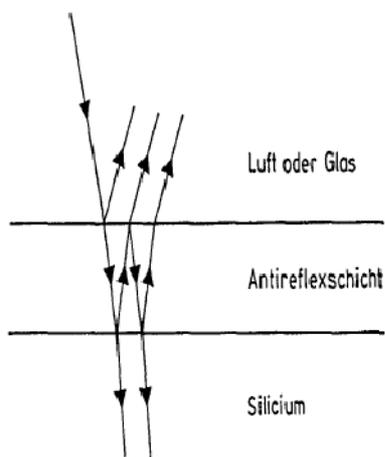


Abbildung 22: Schema einer Antireflexschicht [40]

Durch eine Texturierung der Oberfläche lassen sich Reflexionsverluste bis auf 3% reduzieren. [30] Die optimalste Textur sind sogenannte „invertierte Pyramiden“ (Oberfläche mit pyramidenförmigen Löchern). Ein senkrecht auftreffender Lichtstrahl bekommt dadurch zwei Mal die Möglichkeit ins Material einzutreten. Auch die Absorptionswege verlängern sich.

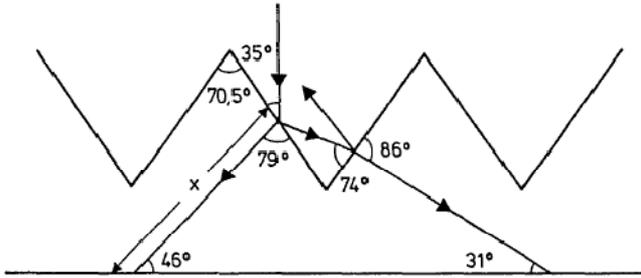


Abbildung 23: Schematischer Querschnitt eines Wafers mit Pyramidentextur [40]

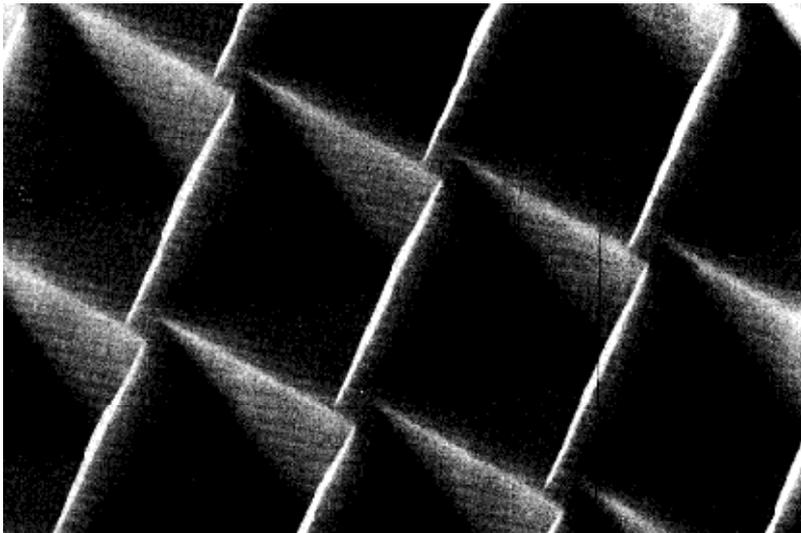


Abbildung 24: Invertierte Pyramidenstruktur unter dem Mikroskop [40]

Ein 200µm dicker Wafer absorbiert 10% der Sonnenstrahlung (AM 1.5) nicht. [30] Durch die Rückseitenkontaktierung entsteht nebenher auch eine Verspiegelung, die Durchstrahlung minimiert. Durch Reflexion an der Verspiegelung verdoppeln sich die Absorptionswege im Waferinneren. Eine „diffuse“ rückseitige Oberfläche (Lambertsche Fläche) verlängert die Absorptionswege weiter. Licht wird im Wafer mehrmals hin und her reflektiert. Es wird im Wafer quasi optisch eingeschlossen, man spricht von „optical confinement“. [30]

Finger und Busbars schatten den Wafer ab. Auf die Abschattung wird im Kapitel 9 ausführlich eingegangen.

## 7 Die Grundidee

Zweck der vorliegenden Arbeit soll der Test von neuen Kontaktierungsverfahren für Siliziumsolarzellen sein. Ziel ist es mit neuen Verfahren die Effizienz der Zellen zu steigern. Augenmerk liegt dabei auch auf möglichst geringer Komplexität bzw. geringen Kosten. Aufwendige teure Vorgehensweisen bei neuen Kontaktierungsmethoden dürfen die Leistungssteigerung nicht wettmachen.

Es werden verschiedene Ansatzpunkte für neue Verfahren aufgezeigt. Im Weiteren die Vorgehensweise und der Grundgedanke für die jeweiligen Versuchsaufbauten erläutert. Probleme und Lösungen bzw. Lösungsvorschläge sollen diskutiert werden.

Allen Versuchsaufbauten gemein ist folgende Idee. Standardmäßig leiten die Finger den Strom zu zwei Kupferbändern, die auf die gedruckten Busse der Solarzelle gelötet sind, ab. Für die Testzelle sind diese Kupferbänder jeweils 0,2mm hoch und 2,5mm breit. Die Grundidee ist es auf die Kupferbusse zu verzichten. Statt deren werden Kupferfeindrähte direkt längs auf die Finger gelötet. Jeder Finger wird quasi mit einem Draht überlötet. Dabei sollen Sinterfinger und Drähte in der Aufsicht möglichst deckungsgleich sein, um die Abschattung gering zu halten. In Serienschaltung in einem Modul sollen die Feindrähte der Vorderseite einer Zelle die Rückseite der nächsten kontaktieren.

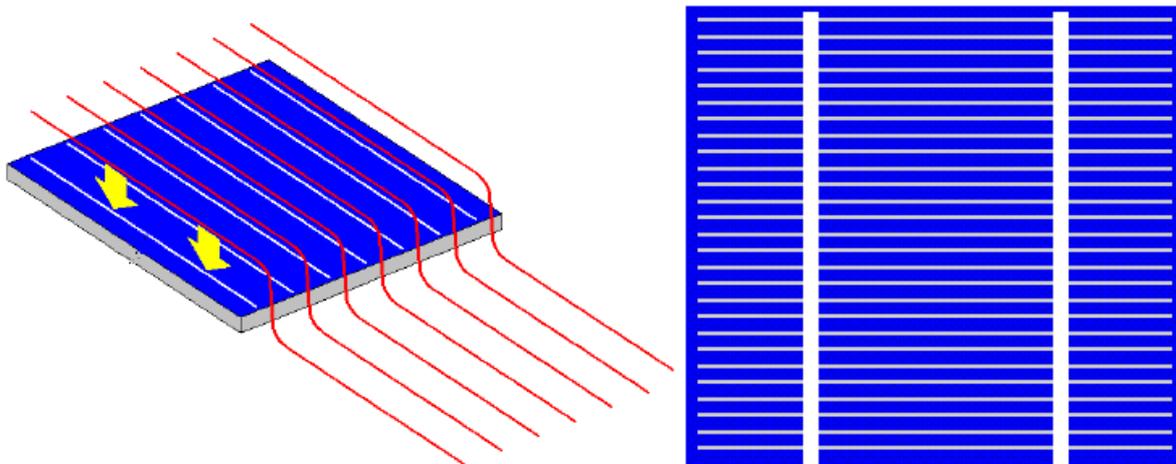


Abbildung 25: Feindrahtkontaktierung (links); Standardkontaktierung mit zwei Bussen (rechts) [41]

Erwartet wird eine Leistungssteigerung in mehrererlei Hinsicht. Durch das Wegfallen der Busbars verringert sich die Abschattung. Hinzu kommt allerdings die Abschattung durch die Feindrähte. Die Ohmschen Verluste in den Bussen verschwinden mit diesen selbst. Hinzu kommen allerdings Ohmsche Verluste in den Kupferfeindrähten. Des Weiteren reduzieren sich die Ohmschen Verluste in den Fingern stark. Im Vergleich zu Bussen und Kupferfeindrähten haben aufgesinterte Finger einen hohen Widerstand. Bei der Feindrahtkontaktierung fließt Strom im Vergleich zum Standardverfahren nur mehr sehr kurze Strecken in den Sinterfinger, da diese an vielen Stellen mit dem Feindraht kontaktiert sind. Verglichen wird auch die beidseitige Abführung des Stroms durch Kupferfeindrähte mit der einseitigen. Standard ist eine einseitige Stromabführung durch Busse. Für eine beidseitige Kontaktierung ist ein Sammler notwendig, der den Strom von beiden Zellseiten zusammenleitet und zur Rückseitenkontaktierung der nächsten Zelle führt. Der Einbau eines Sammlers stellt zusätzlichen Aufwand und Kosten dar. Es sollen für die getesteten Verfahren die variierbaren Parameter des Fingergrids einer Zelle optimiert werden.

Folgende Probleme sind zu erwarten. Auf Silizium lässt sich nicht direkt löten. Dafür stehen nur sehr kleine Kontaktflächen zu Verfügung. Durch die unterschiedlichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Silizium sind mechanische Spannungen wahrscheinlich. Die Haftung der Feindrähte auf dem Wafer wird aus zuvor genannten Gründen negativ beeinflusst.

Da der Ablauf der Versuche größtenteils nicht automatisiert ist, ist Präzision durch Fingerfertigkeit gefragt. Ungenauigkeiten beim Verlöten der Drähte verursachen zusätzliche Abschattung.

## 7.1 Der Draht

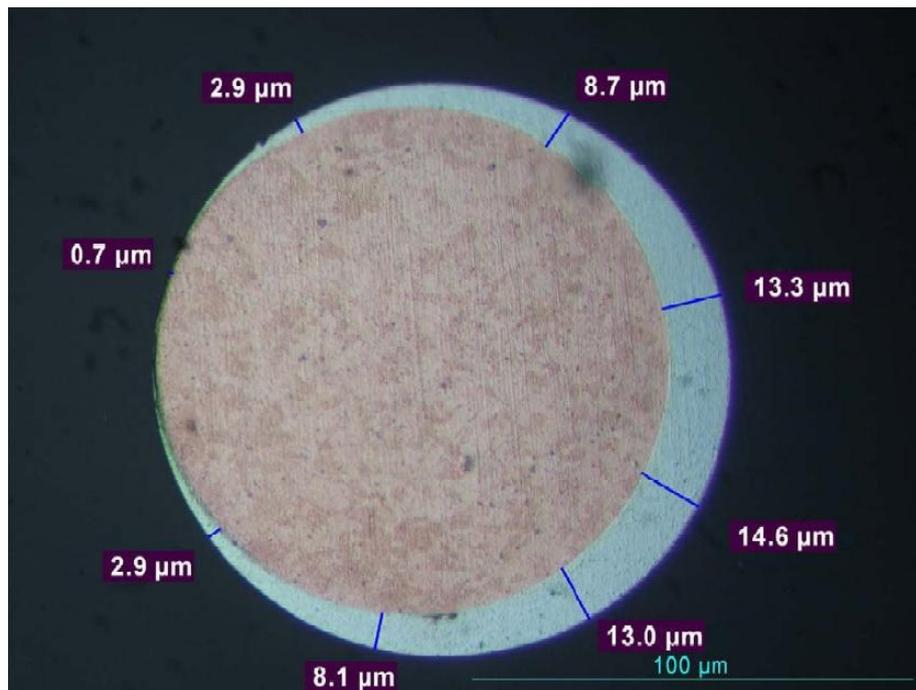


Abbildung 26: Querschnitt des Versuchsdrahts

Sofern möglich, soll die Verlotung der Feindrähte ausschließlich mit der Eigenverzinnung ohne zusätzliches Lot geschehen, sodass kein zusätzlicher Arbeitsschritt notwendig ist.

Der dafür verwendete Draht hat einen 120μm Kupferkern mit einer durchschnittlich 8μm dicken Verzinnungsschicht aus Sn60Pb40 (60% Sn und 40% Pb Massenanteil der Legierung). Der durchschnittliche Drahtdurchmesser nach Vermessung ist 136μm. Die durchschnittliche Fingerdicke ist 160μm. Der Schmelzpunkt von reinem Zinn liegt bei 235°C, der der Legierung ist 183°C. Verbleite Lote sind in der Photovoltaikindustrie üblich. Diese schonen den spröden Wafer aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes. Blei verbessert außerdem die Fließeigenschaften des Lots.

Anfragen bei vielen Produzenten verzinnter Kupferdrähte ergaben, dass eine starke Verzinnungsschichtdicke eines 120μm dicken Kupferkerns nur mit der Technik der Feuerverzinnung zu erreichen ist. Übliche Verzinnungsschichtdicken zum Korrosionsschutz von bis 5μm werden galvanisch hergestellt. Tests mit im Handel

erhältlichen stark (galvanisch) verzinnten Drähten erbrachten keine Haftung beim Löteten nur mit der Eigenverzinnung.

Der Drahtwiderstand ( $0,0147\Omega/\text{cm}$ ) errechnet sich aus dem des Kupferkerns (Leitfähigkeit Kupfer:  $6,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ ) parallel zur dem der Verzinnungsschicht (Leitfähigkeit Sn60Pb40:  $58 \cdot 10^6 \text{ S/m}$  [42]). Der Linienwiderstand der Legierung der Verzinnungsschicht ist dabei größer als ein berechneter Wert aus den einzelnen Leitwerten von Blei und Zinn. Es wird eine konstante Verzinnungsschichtdicke angenommen. Im Vergleich hat ein Sinterfinger einen Linienwiderstand von  $0,29\Omega/\text{cm}$ .

Der Versuchsdraht wurde von einem Feindrahtwerk auf Wunsch angefertigt. Besonderer Dank an dieser Stelle gilt der Firma Edelhoff, die den Draht kostenlos für Studienzwecke zur Verfügung gestellt und kompetent beraten hat.

Sollte ein Verlöten allein mit der Eigenverzinnung der Drähte nicht möglich sein, wird die Lotmenge für die Verlötung durch zusätzliches Lot z.B. in Form von Lötpaste erhöht. Für die vorliegenden Draht- und Zellparameter wurden verschiedene Simulationen gemacht.

## 8 Vorabsimulationen

Vor den verschiedenen praktischen Versuchen bzw. Messreihen wurde die zu erwartende Leistungssteigerung für mit Feindraht kontaktierte Testzellen errechnet. Außerdem wurde die zu erwartende Leistungssteigerung für auf Feindrahtkontaktierung optimierte Zell- und Drahtparameter berechnet.

Das Fingergrid der Testzelle ist auf die Standardkontaktierung ausgelegt. Es sind Busbars aufgesintert. Diese sind bei mit Feindraht kontaktierten Testzellen funktionslos, verursachen jedoch bei den Messergebnissen Verlustleistung durch Abschattung. Fingerabstand und damit, aufgrund der Äquidistanz benachbarter Finger, auch die Fingerzahl könnten durch ein neu entwickeltes Fingergrid auf das Verfahren optimiert werden. Dies gilt auch für andere Parameter wie beispielweise Dicke des Feindrahtes. Für die Testreihen steht allerdings nur Draht ausschließlich mit einem 120µm dicken Kupferkern zur Verfügung.

Zellen mit auf Feindrahtkontaktierung optimiertem Fingergrid herzustellen bzw. in Auftrag zu geben, würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit in Bezug auf Kosten und Zeitaufwand sprengen.

Es steht vor Berechnungen und Versuchsreihen folgendes fest. Eine Leistungssteigerung der mit Feindraht kontaktierten Testzellen gegenüber Standardzellen zu erreichen, ist nicht Ziel der Arbeit, da die Testzellen die für die Feindrahtkontaktierung redundanten Busbars enthalten. Es gilt verschiedene Kontaktierungsmethoden praktisch zu testen und zu dokumentieren. Aus den Messergebnissen der Tests wurde abschließend die mögliche Leistungssteigerung für auf Feindrahtkontaktierung optimierte Parameter approximiert und soweit möglich die Perspektive der jeweiligen Methode dargestellt.

Die Berechnungen in Bezug auf die Effizienz bzw. die Verluste einer Zelle werden teilweise unter Zuhilfenahme des Programms Frontlosses2 durchgeführt. Frontlosses2 berücksichtigt jedoch nur die Verluste der Vorderseite exklusive die der Busse. Das bestehende Programm wurde für diese Aufgabe geringfügig abgeändert.

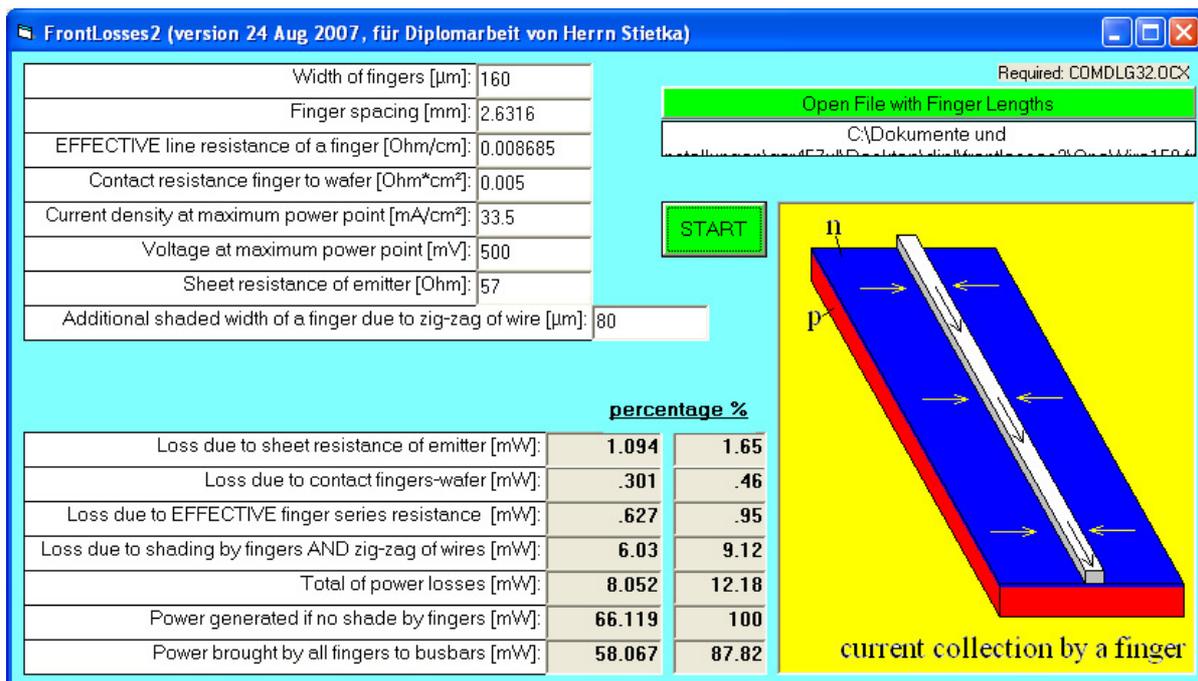


Abbildung 27: Screenshot des Programmes Frontlosses2 mit Ein- (oberer Textblock) und Ausgabeparameter (unterer Textblock)

Frontlosses2 arbeitet folgendermaßen. Das Programm geht bei den Berechnungen von einem gleichmäßigen Strom pro nicht abgeschattete Fläche der Zelle im Arbeitspunkt [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ] aus. Mit der Spannung im Arbeitspunkt wird die Gesamtleistung berechnet und die um die Abschattung reduzierte Gesamtleistung. Zusätzlich lässt sich ein Parameter für extra Abschattung verursacht durch das neue Verfahren variieren.

Für die Berechnung der Ohmschen Verluste arbeitet Frontlosses2 mit einem fixen Wert des Stromes der in der nicht abgeschatteten Fläche generiert wird. Mit dem für die Berechnung konstanten Strom werden für die jeweiligen Widerstände der Spannungsabfall und daraus der Leistungsverlust errechnet.

Mit dem Emitterschichtwiderstand ergeben sich die Ohmschen Verluste in der Emitterschicht. Der Rechengang von Frontlosses2 gleicht jenem der Verluste in der Rückseitenmetallisierung. Dieser wird später in diesem Kapitel explizit ausgeführt.

Aus der Annahme eines konstanten, generierten Stromes pro Waferfläche und äquidistanten Fingern folgt eine simple Berechnung der Kontaktwiderstandsverluste. Vereinfachend angenommen wird, dass durch jedes infinitesimale Kontaktflächenstück zwischen Finger und Wafer der gleiche Strom fließt. Über die gesamte Kontakt bzw. Fingerfläche wird der gesamte serielle Kontaktwiderstand errechnet.

Mit dem Linienwiderstand eines Fingers [ $\Omega/\text{cm}$ ] ergeben sich die Ohmschen Verluste in den Fingern. Für die Berechnungen wird ein Finger in Segmente geteilt. In jeden Bus münden symmetrisch jeweils zwei gleichlange Fingersegmente. Bei der Standardkontaktierung ist ein Finger in vier Fingersegmenten unterteilt, bei Feindrahtkontaktierung mit einseitiger Stromabführung in eines, bei beidseitiger Abführung in zwei. Der Rechengang von Frontlosses2 gleicht jenem der Verluste in den Bussen der Rückseite. Dieser wird später in diesem Kapitel explizit ausgeführt.

Die Verluste in den Bussen und in der Frontseite werden von Frontlosses2 nicht berücksichtigt und werden später in diesem Kapitel explizit ausgeführt.

Frontlosses2 macht einige vereinfachende Annahmen: Die Randbereiche der Zelle und das dort von der Periodizität abweichende Fingergrid gehen nicht ein. Die Auswirkung der Busse auf die Verluste im Emitter bleibt unberücksichtigt. Statt von der U-I-Abhängigkeit einer Arbeitskurve wird von einer gleichen, konstant generierten Strommenge pro Flächenstück im Nahbereich um den Arbeitspunkt ausgegangen. Diese Vereinfachungen sind tragbar, da die Ergebnisse vergleichende Funktion haben. Methoden werden einander gegenübergestellt, der Absolutwert ist nachrangig.

Die Eingabeparameter für Frontlosses2 und Anmerkungen zu diesen sind folgende:

-Fingersegmentlänge

-Zahl der Fingersegmente

-Abstand zweier benachbarter Finger

-Fingerdicke

- effektiver Linienwiderstand eines Fingers [ $\Omega/\text{cm}$ ]: Für einen einzelnen Finger ist eine normale Vierpunktmessung nicht möglich. Der Spannungsabfall über dem Finger

wird durch Parallelwiderstände durch das restliche Fingergrid und durch den Emitterschichtwiderstand verfälscht. Die einzelnen Finger sind miteinander durch Busse und den Emitter leitend verbunden. Im beleuchteten Zustand einer Zelle gleichen sich die Parallelströme aus. Aus dem Spannungsabfall über einem Finger im Arbeitspunkt einer Hellkurve lässt sich auf den Linienwiderstand rückrechnen. Die Formel für den Spannungsabfall eines Fingers kann prinzipiell wie die für die Verluste der Busse der Rückseite hergeleitet werden. Diese folgt später in diesem Kapitel. Durch Messungen im Arbeitspunkt ergab sich für den Linienwiderstand eines Sinterfingers, die Bestätigung eines üblichen, typischen Wertes von  $0,29 \Omega/\text{cm}$ . Der effektive Linienwiderstand eines Fingers für die Feindrahtkontaktierung ist der des Drahtes parallel zu dem des Sinterfingers.

-Kontaktwiderstand: Für den Kontaktwiderstand wurde ein typischer Wert von  $0,005\Omega\cdot\text{cm}^2$  angenommen, was laut [43] typisch ist.

-Emitterschichtwiderstand: Der Schichtwiderstand des Emitters wurde mit Frontlosses<sup>2</sup> approximiert. Die Annahme für die Approximation war, dass der Hersteller den Fingerabstand auf den vorliegenden Schichtwiderstand hin optimiert hat. Somit approximiert man durch Variation von Schichtwiderstand und Fingerabstand den Schichtwiderstand, der bei gegebenem Fingerabstand der Testzelle von  $2,6316\text{mm}$ , die maximale Effizienz für die Zelle ergibt. Dies ist bei  $47\Omega$  der Fall.

-generierter Strom pro nicht abgeschattete Fläche im Arbeitspunkt [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ]: Ausgangspunkt der Berechnung dieses Werts ist der Strom im Arbeitspunkt einer fast baugleichen Zelle. Der Wert wurde einem Q-Cells Datenblatt [44] entnommen. Um auf den generierten Strom zu kommen, mussten Ohmsche und Abschattungsverluste hinzugerechnet werden. Für die Verluste wurde ein typischer Wert angenommen. Der generierte Strom pro nicht abgeschattete Fläche im Arbeitspunkt beträgt für die Testzelle  $33,5\text{mA}/\text{cm}^2$ .

-Spannung im Arbeitspunkt: Aus selbigem Datenblatt [44] wurde eine Spannung im Arbeitspunkt von  $500\text{mV}$  ausgelesen.

## 8.1 Berechnung der Verlustleistung in der Rückseitenmetallisierung

Für die Berechnung der Verluste in der Rückseitenmetallisierung ist es notwendig den Schichtwiderstand zu messen. Die rückseitig aufgebraachte Metallisierung besteht aus vollflächig aufgesinterter Aluminiumpaste. Auf dieser befinden sich zwei aufgelötete Kupferbänder, die den Strom von der Rückseite abführen. Zweipunktmessungen liefern hier unbrauchbare Ergebnisse, da der Kontaktwiderstand zwischen Messspitze und Metallisierung zu groß für die Messung eines kleinen Schichtwiderstands ist. Um den Schichtwiderstand mit möglichst geringem Fehler messen zu können, ist eine spezielle Vierpunktmessung notwendig. Ein eingepprägter Strom wird für beide Pole über zwei Kontaktleisten mit jeweils zehn gefederten Kontaktnadeln mit möglichst gleichmäßiger Flächenstromdichte durch die Schicht geleitet und folgendermaßen berechnet.

$$R = \frac{U}{I} \quad (8.1)$$

$$R = \rho \frac{l}{b} \quad (8.2)$$

$$\rho = \frac{U \cdot b}{I \cdot l} \quad (8.3)$$

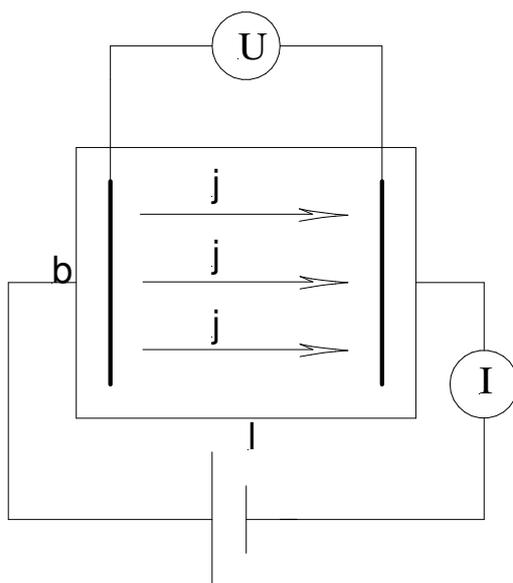


Abbildung 28: Schema einer Schichtwiderstandsmessung (links); Kontaktleiste zum gleichmäßigen Kontaktieren einer geraden Linie auf einem Wafer (rechts)

Wobei gilt:

U...gemessene Spannung zwischen zwei Punkten mit dem Abstand l

b...Breite auf der die Schicht vom Strom I mit gleichmäßiger Flächenstromdichte j durchflossen wird

Messungen für den Schichtwiderstand  $\rho$  ergaben im Mittel  $0,006811\Omega$ .

Mit den Angaben des Herstellers [46] der Alusinterpaste,  $0,0073\Omega$  pro Mil Schichtdicke (Mil= 1/1000 Inch), ergibt sich eine Metallisierungsdicke von  $d=27,224\mu\text{m}$ .

Der Ansatz der Berechnung der Verluste in der Metallisierung ist, den Verlust für ein infinitesimales Flächenstück mit dem Schichtwiderstand  $\rho$  zu berechnen. Dieses wird vom Beitrag des Strom I aller Flächenstücke durchflossen, die mit diesem auf einer Normalen zum Bus liegen und weiter vom Bus entfernt sind (siehe Abbildung 29). Einem Bus wird Strom aus zwei Vierteln der Fläche der Alurückseitenmetallisierung zugeleitet, das heißt aus der gesamten Fläche, welche dem jeweiligen Bus am nächsten liegt. Dies gleicht der Unterteilung eines Fingers in Fingersegmente. Die Formel für die Verlustleistung eines Viertels der Rückseite leitet sich folgendermaßen ab.

$$P = UI \quad (8.4)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (8.5)$$

$$I = jA; A = x \cdot dy \quad (8.6)$$

$$R = \rho \frac{l}{b}; l = dx; b = dy \quad (8.7)$$

$$P = \int_0^a \int_0^b \rho \cdot j^2 \cdot x^2 dy dx = \rho \cdot j^2 \frac{a^3}{3} b \quad (8.8)$$

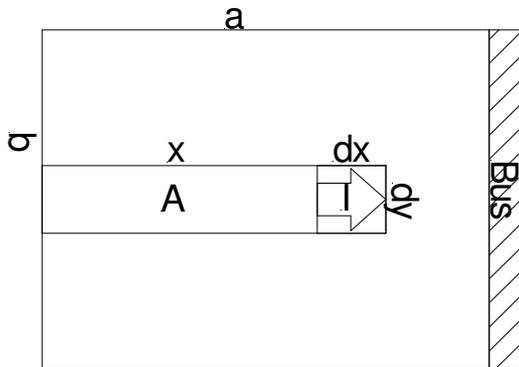


Abbildung 29: Darstellung zur Berechnung von Verlusten in einer Schicht mit dem Schichtwiderstand  $\rho$

R...Widerstand eines Flächenstücks mit dem Schichtwiderstand  $\rho$

$j$  ...generierter Strom pro Fläche [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ], den die unabgeschattete Fläche ohne Ohmsche Verluste generieren würde

A... die Fläche die den Strom generiert, der durch ein infinitesimales Flächenstück  $dx \cdot dy$  fließt

a... ein Viertel der um die Busbreiten verringerte Zellbreite

b...Zellbreite

U...Spannungsabfall über einem Flächenstück

I...Strom durch ein Flächenstück

So ist die relative Verlustleistung  $P$  für die gesamte Rückseitenmetallisierung 7,2 mW, das sind prozentuell 0,2% (in Bezug auf eine Zelle ohne frontseitige Verluste). Die gleiche Rechnung für Feindrahtkontaktierung ergibt zu vernachlässigende Verluste. Im Vergleich zu den zwei Bussen nehmen die vielen Feindrähte viel gleichmäßiger auf. Strom fließt nur mehr sehr viel kürzere Wege in der Metallisierung.

Die Rechnungen basieren auf der Annahme eines großen Schichtwiderstands der Rückseitenmetallisierung bei kleinem Linienwiderstand der Busse. Diese Annahme ist nicht gerechtfertigt, jedoch stellt sie eine Obergrenze für die Verluste in der Rückseitenmetallisierung dar. Eine exakte Berechnung ist sehr komplex. Aufgrund der

Größenordnung der Verluste in der Rückseitenmetallisierung sind diese kein gewichtiges Teil der Gesamtverluste.

## 8.2 Berechnung der Verlustleistung in den Bussen der Vorderseite

Für die Berechnung der Verlustleistung in den Bussen werden diese in Segmente aufgeteilt. Jeder Bus hat 57 Segmente, in die jeweils ein Finger seinen Strom transportiert. So fließt durch jedes der Stromabführung nähere Segment mehr Strom als durch das vorige.

Vorab muss der Gesamtlinienwiderstand der Busse, welcher sowohl Kupferbänder als auch die darunterliegenden aufgesinterten Leiterbahnen inkludiert, berechnet werden. Der Widerstand der Kupferbänder errechnet sich aus dem spezifischen Widerstand für Kupfer und deren Querschnitt (0,5mm<sup>2</sup> Querschnitt pro Band). Der Wert für die Leiterbahnen darunter wird aus dem Linienwiderstand für die Finger hochgerechnet. Der Gesamtlinienwiderstand der Busse  $r_{\text{Busse}}$  ist 0,000177Ω/cm.

$$R_{\text{Seg}} = l_{\text{Seg}} r_{\text{Busse}} \quad (8.9)$$

$$P = R_{\text{Seg}} \left( I_{\text{Seg}}^2 + (2I_{\text{Seg}})^2 + \dots + (56I_{\text{Seg}})^2 + (57I_{\text{Seg}})^2 \right) \quad (8.10)$$

$R_{\text{Seg}}$ ...gesamter Widerstand beider Busse auf der Länge eines Segments

$I_{\text{Seg}}$ ...57. Teil des Gesamtstroms der Zelle am Arbeitspunkt, welcher einem Finger zugeschrieben wird.

$l_{\text{Seg}}$ ...Länge eines Segments 1/57 der Waferbreite

Die berechnete Verlustleistung bei einer standardkontaktierten Testzelle P in den Bussen auf der Vorderseite ist 47,03mW, dies sind in Prozent der Gesamtleistung der Zelle (3,77W) ohne Ohmsche und Abschattungsverluste 1,29% bei einem Gesamtstrom von 7,54A für eine 150mm\*150mm Zelle. Etwas anders ist die Berechnung zu den rückseitigen Bussen.

### 8.3 Verluste in den Bussen der Rückseite

Zu den Bussen wird aus der Rückseite auf deren ganzer Länge gleichmäßig Strom aus der Metallisierung transportiert. Somit wird hier, anstatt wie vorderseitig den Bus in Segmente aufzuteilen, integriert. Dies ist schematisch dieselbe Rechnung wie die Berechnung der Verlustleistung in den Fingern. Für einen Bus lautet die Ableitung:

$$r = \frac{U}{I} \quad (8.11)$$

$$P = UI \quad (8.12)$$

$$I = j \cdot y \quad (8.13)$$

$$P = \int_0^a r \cdot j^2 y^2 dy = r \cdot j^2 \frac{a^3}{3} \quad (8.14)$$

Wobei gilt:

a...Waferlänge

I...Strom durch ein Stück Bus der Rückseite

U...Spannungsabfall über einem Stück Bus der Rückseite

r...Linienwiderstand eines Kupferbandes

y...Längskoordinate eines Busses auf der Rückseite

j...Strom, der in der Rückseitenmetallisierung einem Bus zufließt, pro Länge des Busses

P...Verluste eines Busses

Die berechnete Verlustleistung beider Busse der Rückseite ist 42,1mW, dies sind in Prozent der Gesamtleistung der Testzelle ohne Ohmsche und Abschattungsverluste 1,16%. Die gleiche Rechnung für die Ohmschen Verluste aller Feindrähte der Rückseite kommt auf 1,35% Verluste. Diese Rechnungen basieren auf der Annahme eines relativ großen Schichtwiderstands der Rückseitenmetallisierung gegenüber dem Linienwiderstand der Busse. Diese Annahme ist nicht gerechtfertigt. Ein großer Teil des Stromes in paralleler Richtung zu den Bussen wird auch von der Metallisierung getragen. Eine exakte Berechnung ist jedoch komplex. Es ist anzunehmen, dass eine exakte Berechnung aufgrund der vollflächigen gut leitenden

Rückseitenmetallisierung niedrigere Verluste ergäbe. Strom fließt hier nicht mehr normal zu den Kupferbändern zu. Es kann allerdings eine Abschätzung gemacht werden für die minimalen Verluste der gesamten Rückseite, welche jene sowohl in der Metallisierungsschicht als auch in den Bussen inkludiert. Annahme ist, der Strom fließt in der Metallisierung parallel zu den Bussen. Hierzu wird wie für die Verluste in den Bussen gerechnet allerdings mit einem Gesamtlinienwiderstand (von Metallisierungsschicht und Rückseitenbussen) für die Metallisierung parallel zu den Bussen wirkend. Die minimalen Gesamtverluste der Rückseite in Prozent der Gesamtleistung der Testzelle ohne Ohmsche und Abschattungsverluste betragen 0,96%.

## 8.4 Mechanische Spannungen verursacht durch Löten

Die Kontaktierung der Kupferdrähte auf der Solarzelle mittels Löten birgt Probleme in sich. Da sich beim Löten sowohl Wafer als auch Draht erwärmt, sich Kupfer aber stärker dabei ausdehnt als Silizium, treten beim Abkühlen der Zelle Spannungen auf. Diese können, ähnlich einem Bimetallstreifen, den gesamten Wafer krümmen oder sogar zerstören. Beim Standardverfahren werden die Busse der Vorder- und Rückseite gleichzeitig gelötet, um eine Krümmung der kontaktierten Zellen durch symmetrische Krafteinwirkung zu vermeiden.

Man kann von einer Erstarrungstemperatur des Lots von 183°C (Sn60Pb40) und einem kaltem Wintertag von -20°C, dem die Zelle ausgesetzt sein könnte, ausgehen. Betrachtet man zur Veranschaulichung zwei bei einer Temperatur T gleich lange Stäbe einer aus Kupfer einer aus Silizium, berechnet sich die Längendifferenz nach einer Abkühlung beider Stäbe auf die selbe Temperatur mit den linearen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{\text{Silizium}}=2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  und  $\alpha_{\text{Kupfer}}=16,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  [6] folgendermaßen.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T} \quad (8.15)$$

$$\frac{L}{L_0} = (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (8.16)$$

$$\left( \frac{L}{L_0} \right)_{\text{Kupfer}} - \left( \frac{L}{L_0} \right)_{\text{Silizium}} = 0,004217 \quad (8.17)$$

Mit den Zahlenwerten für Kupfer und Silizium ergibt sich eine Längendifferenz von 0,4217%.

Zur Verdeutlichung wird auch die Kraft, die ein Kupferdraht mit dem Querschnitt von 57 Kupferkernen von Kupferfeindrähten bei einer Dehnung von 0,4217% bei Raumtemperatur ausübt, berechnet. Kupfer hat ein Elastizitätsmodul von  $120\text{kN/mm}^2$ . Die mechanischen Spannungsverhältnisse für die Feindrahtkontaktierung sind aus folgenden Gründen nicht abschätzbar. Die genaue Temperaturverteilung im Wafer und in den Drähten ist unbekannt. Silizium hat ein Elastizitätsmodul der Größenordnung wie Kupfer. Die stauchende Kraft durch die aufgelöteten Kupferdrähte auf den Wafer ist nur einseitig und erzeugt ein Biegemoment. Es wird teilweise manuell gearbeitet, die Lötflächengröße variiert stark und ist dabei aufgrund der erhabenen Finger uneben. Die Festigkeit der Lötung ist somit schwer einschätzbar und sehr unterschiedlich.

Für den Hook'schen Bereich gilt:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8.20)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8.21)$$

$$F = E\sigma A \quad (8.22)$$

Ein Kupferdraht mit einem Querschnitt, der dem aller Feindrähte entspricht, übt bei einer Dehnung von 0,4217% bei Raumtemperatur eine Kraft von 326N aus.

Geht man nun von einer durchschnittlichen Drahttemperatur bei der Erstarrung von  $183^\circ\text{C}$  aus, muss eine Dehnung von 0,4217% ausgeglichen werden. Ein Ansatz für die Lösung des Problems ist ein punktwises Löten des Drahtes auf den Finger. Zwischen den Lötunkten soll sich der Draht nun im Zick-Zack schlängeln. Ziel des Schlängelns ist, dass der Draht ohne großen Spannungsaufbau beim Erkalten frei kontrahieren kann. Das Schlängeln kann erreicht werden, indem man dem Draht vor dem Löten durch Biegung eine Meandering einprägt.

Ziel ist eine Längendifferenz zwischen Finger und Länge des meanderten Drahtes eine Differenz von 0,4217% zu erreichen. In diesem Fall minimieren (Federwirkung einer Meandering übt immer noch gewisse Kraft auf den Wafer aus) sich die mechanischen Spannungen beim Erkalten. Betrachtet man den Lötspunkt als Scheitelpunkt eines Auslenkwinkels, sind der Sinterfinger und der Draht die beiden Schenkel. In jedem Scheitelpunkt ist dabei eine Punktlötung vorgesehen. Für die gewünschte Längendifferenz ist ein Auslenkwinkel von mindestens  $5,25^\circ$  notwendig.



Abbildung 30: Horizontale Meandering in der Ebene des Wafers in der Aufsicht auf den Wafer; Pl...Punktlötungspunkt

Geht man von einer Meandering in der Ebene des Wafers aus, erzeugt diese zusätzliche Abschattung. Diese ist bei fixem Auslenkwinkel und senkrechter Sonneneinstrahlung von der maximalen Auslenkung des Drahtes zum Finger abhängig. Die maximale Auslenkung ist direkt proportional zum Abstand zweier benachbarter Lötspunkte. Die Längendifferenz von Feindraht und Sinterfinger vor dem Löten hängt nur vom Auslenkwinkel ab. Eine Abschätzung ergibt für eine Längendifferenz von 0,4317% und eine maximale Auslenkung von einem Drahtdurchmesser zirka 50% Mehrabschattung relativ zur Abschattung der Sinterfinger der Testzelle. Eine maximale Auslenkung von einem Drahtdurchmesser von  $136\mu\text{m}$  entspricht einem Lötspunktabstand von 3,48mm. Es muss jedoch nicht jeder Kreuzungspunkt von Draht und Sinterfinger verlötet werden.

50% der Fingerabschattung beim Standardverfahren entsprechen zirka der Busabschattung. Somit beruhen Leistungsgewinne bei Feindrahtkontaktierung nur mehr auf Ohmschen Gewinnen. Für Vorabberechnungen der Effizienz werden maximal 50% zusätzliche Abschattung erlaubt.

Schafft man es die Meanderungsebene des Drahtes beim Verlöten normal zur Waferebene bzw. vertikal zu halten, sind bei senkrechter Sonneneinstrahlung prinzipiell 0% zusätzliche Abschattung möglich. Wie weit es möglich ist ein Umkippen des Drahtes beim Löten zu verhindern gilt es zu testen.

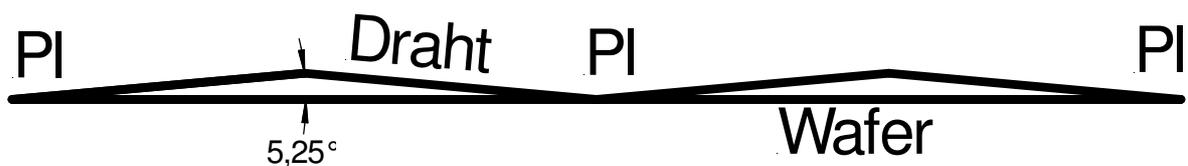


Abbildung 31: Vertikale Meanderung normal zur Ebene des Wafers in Seitenansicht. Pl...Punktlötung

Um Mechanische Spannungen zu verringern, kann auch ein anderer Ansatz in Betracht gezogen werden. Gelingt es Wafer und Draht beim Löten eines Löt punkts nur punktweise zu erhitzen, verringert dies ebenfalls die mechanische Spannung und verbessert somit die Haftung. Eine Meanderung wäre somit nicht notwendig. Löt punktabstände wären von der Meanderung unabhängig. Ob dies möglich ist, gilt es praktisch zu testen.

## 8.5 Verluste in den Fingerteilstücken

Es handelt sich hierbei um die Ohmschen Verluste in den Teilstücken der Sinterfinger, die den Strom zum nächsten Löt punkt leiten. Von dort fließt er hauptsächlich durch die Drähte weiter.

Jedem Löt punkt fließt dabei von links und rechts jeweils von der Länge eines halben Löt punktabstandes Strom aus einem Feindraht zu. Die Berechnung der Verlustleistung ähnelt der, der Verluste in den Bussen der Rückseite. Je mehr Löt punkte vorhanden sind, desto mehr Teilstücke tragen den Gesamtstrom. Je mehr Löt punkte vorhanden sind, desto geringer ist der Widerstand eines Teilstückes aufgrund seiner geringeren Länge. Löt punktabstand und Verluste in den Teilstücken stehen daher in indirekter

quadratischer Abhängigkeit. Halbiert man beispielweise den Lötunktastand wird der Strom von der doppelten Anzahl parallel zueinander wirkenden Fingerteilstücken getragen, die jeweils nur die halbe Länge haben.

Für die gesamte Verlustleistung über alle Fingerteile mit folgenden Lötunktaständen 0,34809cm,  $l=1\text{cm}$  und  $l=2,143\text{cm}$  für die Testzelle ergeben sich 0,1773mW, 1,323mW und 6,08mW. In Prozenten zur Gesamtleistung ohne Verluste sind das 0,00043%, 0,036% und 0,167%. Die Verluste sind selbst bei einem Abstand von 2,143cm sehr klein.

Diese geringen Verluste stellen nun die Notwendigkeit einer Fingerbreite von  $160\mu\text{m}$  in Frage. An einen Verzicht der aufgesinterten Finger ist nicht zu denken, da man nicht direkt auf Silizium löten kann. Jedoch würden dünnere Finger die gesamte Abschattung verringern. Außerdem bieten diese die Möglichkeit dünnere Drähte einzusetzen, was eventuell auch zu einer verbesserten Effizienz führen kann. Mit schmalen mehrfach bedruckten Fingern wurden bereits gute Ergebnisse erzielt (siehe Kapitel 4.1.3). [23]

## 9 Ergebnisse der Vorabrechnungen

Folgende Tabellen sind Abschätzungen verschiedener Leistungssteigerungen anhand von Berechnungen, teilweise mit Frontlosses2 durchgeführt und ergänzt. Die Rückseite bleibt dabei unberücksichtigt. Wie bereits erwähnt sind genaue Berechnungen aufgrund der Metallisierung mit niedrigem Schichtwiderstand schwierig. Die kumulierten Verluste der Rückseite (in der Metallisierung und in den Bussen bzw. Feindrähten der Rückseite) sind bei der Standardkontaktierung und der Feindrahtkontaktierung ähnlicher Größenordnung, da der Strom hier weniger in Bussen oder Feindrähten transportiert wird, sondern in der Metallisierungsschicht, aufgrund ihrer Vollflächigkeit. Deswegen und wegen der bereits erwähnten sehr starken Vereinfachung bei den Berechnungen der Rückseitenverluste, bleiben diese für weitere Vergleiche unberücksichtigt.

Als Referenz für die Berechnungen der Leistungssteigerungen bei der Feindrahtkontaktierung diene Tabelle 1. Hier wurde die Stromabführung mit Kupferbussen, Busbars und Sinterfingern berechnet. 100% stellen bei allen Tabellen in diesem Kapitel die Effizienz einer Zelle ohne frontseitige Verluste dar. Dies betrifft sowohl Ohmsche als auch Abschattungsverluste. Die rechnerischen Verluste der Vorderseite betragen bei der Standardkontaktierung 14,48%. Diesen Wert galt es mittels der Feindrahtkontaktierung zu unterbieten. Die Vorabberechnungen dienten lediglich zur Konfiguration der Versuchsanordnungen und sollten auf die Messreihen vorausschauen und einen Vergleich zu diesen darstellen. Deshalb gingen in die berechneten Effizienzen der feindrahtkontaktierten Zellen der Messreihen hierbei Abschattungsverluste von 3.33% bzw. 3.13% (abzüglich der Überschneidung mit der Sinterfingerabschattung) von den aufgesinterten Busbars nicht ein, die zwar bei feindrahtkontaktierten Testzellen vorhanden jedoch funktionslos sind.

|                                                   | Zellparameter | Verluste durch            |        |
|---------------------------------------------------|---------------|---------------------------|--------|
| Fingerbreite( $\mu\text{m}$ )                     | 160           | Emitterschichtwiderstand  | 1,51%  |
| Fingerabstand(mm)                                 | 2,63          | Kontaktwiderstand         | 0,49%  |
| Fingergesamtwiderstand( $\text{Ohm}/\text{cm}$ )  | 0,29          | Fingergesamtwiderstand    | 1,98%  |
| Kontaktwiderstand( $\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$ ) | 0,005         | Gesamtabschattung         | 9,21%  |
| I am Arbeitspunkt( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )      | 33,5          | Fingerteilstückwiderstand | ~      |
| U am Arbeitspunkt(V)                              | 0,5           | Vorderseitenbuswiderstand | 1,29%  |
| Emitterschichtwiderstand( $\text{Ohm}$ )          | 47            | Effizienz                 | 85,52% |
| Zusätzliche Abschattung(%)                        | ~             |                           |        |
| Drahtdicke( $\mu\text{m}$ )                       | ~             |                           |        |
| Lötunktastand(mm)                                 | ~             |                           |        |
| Fingerstromabführung                              | Busse         |                           |        |

*Tabelle 1: Testzelle standardkontaktiert*



*Abbildung 32: Multikristalline Siliziumsolarzellen durch auf die Busbars gelöteten Kupferbänder standardkontaktiert*

|                                        | Zellparameter | Verluste durch            |        |
|----------------------------------------|---------------|---------------------------|--------|
| Fingerbreite( $\mu\text{m}$ )          | 160           | Emitterschichtwiderstand  | 1,36%  |
| Fingerabstand(mm)                      | 2,63          | Kontaktwiderstand         | 0,46%  |
| Fingergesamtwiderstand(Ohm/cm)         | 0,0087        | Fingergesamtwiderstand    | 0,95%  |
| Kontaktwiderstand(Ohm* $\text{cm}^2$ ) | 0,005         | Gesamtabschattung         | 9,02%  |
| I am Arbeitspunkt(A)                   | 33,5          | Fingerteilstückwiderstand | 0,00%  |
| U am Arbeitspunkt(V)                   | 0,5           | Vorderseitenbuswiderstand | ~      |
| Emitterschichtwiderstand(Ohm)          | 47            | Effizienz                 | 88,21% |
| Zusätzliche Abschattung(%)             | 50            |                           |        |
| Drahtdicke( $\mu\text{m}$ )            | 160           |                           |        |
| Lötunktastand(mm)                      | 3,48          |                           |        |
| Fingerstromabführung                   | einseitig     |                           |        |

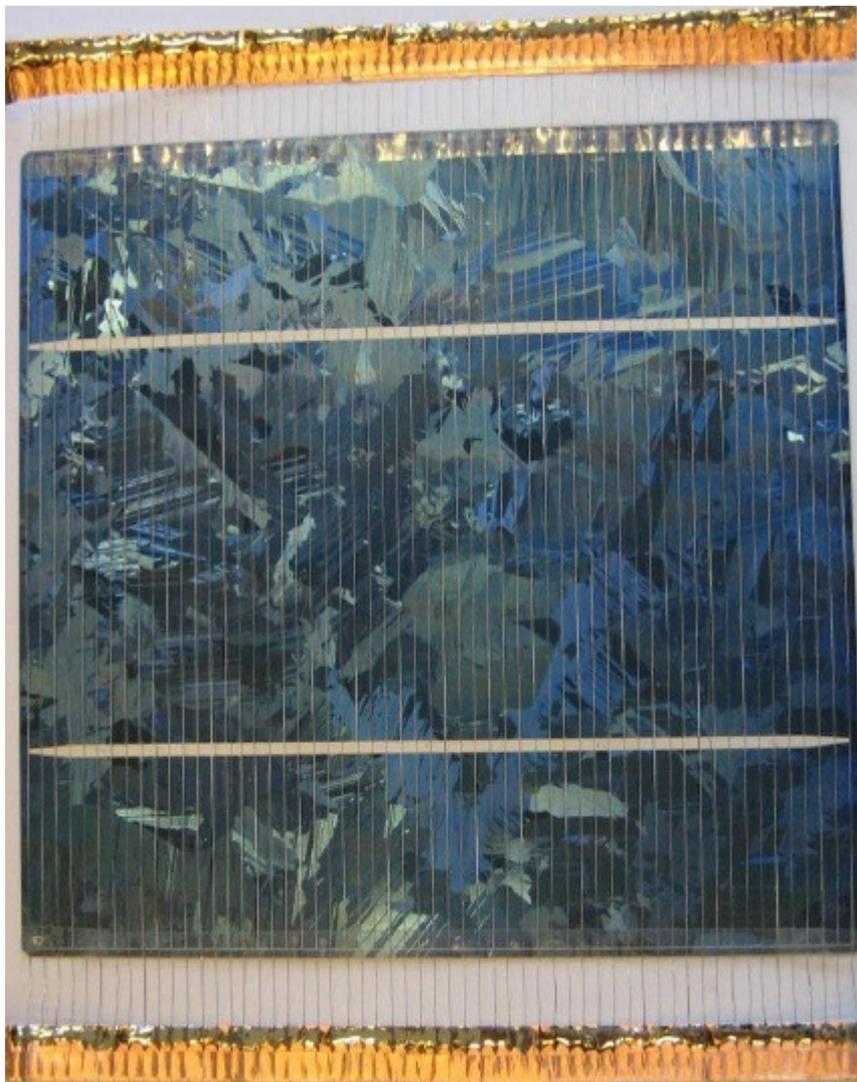
*Tabelle 2: Feindrahtkontaktierte Testzelle bei 50% Mehrabschattung zur Fingerabschattung und einseitiger Stromabführung*



*Abbildung 33: Feindrahtkontaktierte Siliziumsolarzelle mit einseitiger Stromabführung und Kupfersammler*

|                                        | Zellparameter | Verluste durch            |        |
|----------------------------------------|---------------|---------------------------|--------|
| Fingerbreite( $\mu\text{m}$ )          | 160           | Emitterschichtwiderstand  | 1,36%  |
| Fingerabstand(mm)                      | 2,63          | Kontaktwiderstand         | 0,46%  |
| Fingergesamtwiderstand(Ohm/cm)         | 0,0087        | Fingergesamtwiderstand    | 0,24%  |
| Kontaktwiderstand(Ohm* $\text{cm}^2$ ) | 0,005         | Gesamtabschattung         | 9,02%  |
| I am Arbeitspunkt(A)                   | 33,5          | Fingerteilstückwiderstand | 0,00%  |
| U am Arbeitspunkt(V)                   | 0,5           | Vorderseitenbuswiderstand | ~      |
| Emitterschichtwiderstand(Ohm)          | 47            | Effizienz                 | 88,92% |
| Zusätzliche Abschattung(%)             | 50            |                           |        |
| Drahtdicke( $\mu\text{m}$ )            | 160           |                           |        |
| Lötunkt Abstand(mm)                    | 3,48          |                           |        |
| Fingerstromabführung                   | beidseitig    |                           |        |

*Tabelle 3: Feindrahtkontaktierte Testzelle mit bei 50% Mehrabschattung zur Fingerabschattung und beidseitiger Stromabführung*



*Abbildung 34 Feindrahtkontaktierte Siliziumsolarzelle mit beidseitiger Stromabführung und Kupfersammler*

Vergleicht man die Effizienz von Tabelle 1 85,52% (standardkontaktierte Zelle) mit derer von Tabelle 2 88,21% (feindrahtkontaktierte Zelle) ist eine relative Leistungssteigerung der feindrahtkontaktierten Zelle von 3,15% in Bezug auf die standardkontaktierte Zelle zu erwarten. Bei der Vermessung der feindrahtkontaktierten Zellen ist jedoch noch die redundante Bussabschattung von 3,13% (in Bezug auf eine Zelle ohne Frontseitenverluste) enthalten. Für die Rohdaten der Messergebnisse wird daher eine Leitungsminderung von 0,51% (in Bezug auf eine standardkontaktierte Zelle) erwartet.

50% (100% stellen die ganze Abschattung der Sinterfinger dar) für den Parameter zusätzliche Abschattung sind das Worst-case Szenario. Die 50% zusätzliche Abschattung bezieht sich auf eine möglicherweise aufgrund von mechanischen Spannungen notwendige Meandering des Drahtes. Auch, falls keine Meandering nötig ist oder vertikal meandert wird, kann durch nicht Deckungsgleichheit von Sinterfingern und Drähten zusätzliche Abschattung auftreten. Nach Abschätzungen könnte eine horizontale Meandering bis zu 50% mehr abschatten. Insgesamt wurde die zusätzliche Abschattung durch die Feindrähte mit +50% im Verhältnis zur Sinterfingerabschattung abgeschätzt. Durch Reduzierung des Fingergrids um die rudimentären Busbars, hätte man bei einseitiger Stromabführung bereits eine Leistungssteigerung von 2,69% (in Bezug auf eine Zelle ohne frontseitige Verluste, d. h.: auf 100%) bzw. 3,15% (in Bezug auf die standardkontaktierte Zelle, d.h.: 85,52%), bei beidseitiger 3,69% (in Bezug auf die standardkontaktierte Zelle). Diese wird hauptsächlich von Ohmschen Gewinnen getragen, da die Busabschattung in etwa 50% der Fingerabschattung entspricht.

Wie bereits erwähnt kann bei der Feindrahtkontaktierung der Strom zu einer oder zu beiden Seiten der Zelle abgeführt werden. Durch die beidseitige Stromabführung wie in Tabelle 3 steigert sich die Effizienz für die Testzelle um weitere 0,71% (in Bezug auf eine Zelle ohne frontseitige Verluste). Für die Berechnung der beidseitigen Stromabführung halbiert man die Fingersegmentlänge bei doppelter Fingersegmentzahl.

Für die finalen Messreihen wurden Testzellen vergleichbar mit der Standardkontaktierung allerdings provisorisch, reversibel und nicht durch Verlötung von Bussen kontaktiert und einvermessen. Danach wurden sie feindrahtkontaktiert und mit der Stromabführung über die Feindrahtkontaktierung jeweils ein- und beidseitig nochmals vermessen und verglichen.

Die folgende Tabelle gilt für eine fiktive Zelle, deren Fingergrid auf Feindrahtkontaktierung optimiert sind. Aufgesinterte Busbars sind nicht mehr vorhanden. Sowohl Fingerabstände und Drahtdicke sind auf das Kontaktierungsverfahren optimiert. Da die Verluste in den Fingerteilstücken minimal sind wird der Wert der Sinterfingerdicke geringer als die Drahtdicke gesetzt. Die Dicke der Sinterfinger hat vom erzeugungstechnischen Standpunkt her allerdings einen Minimalwert, der nicht ohne gravierende Effektivitätseinbußen in Form von Ohmschen Verlusten unterschritten werden kann. Somit werden die Sinterfingerdicke mit  $80\mu\text{m}$  und die Drahtdicke mit  $90\mu\text{m}$  angenommen. Es wird auch nicht von der Notwendigkeit einer Meanderung ausgegangen. Somit ist keine zusätzliche Abschattung vorhanden. Aufgrund der geringen Verluste in den Fingerteilstücken wird der Lötunktastand auf  $1\text{cm}$  gesetzt. Der Strom wird hier beidseitig abgeführt. Der Optimalwert für den Fingerabstand ergibt sich durch Parametervariation mit Frontlosses2.

|                                        | Zellparameter | Verluste durch            |        |
|----------------------------------------|---------------|---------------------------|--------|
| Fingerbreite( $\mu\text{m}$ )          | 80            | Emitterschichtwiderstand  | 1,19%  |
| Fingerabstand(mm)                      | 2,26          | Kontaktwiderstand         | 0,78%  |
| Fingergesamtwiderstand(Ohm/cm)         | 0,02232       | Fingergesamtwiderstand    | 0,58%  |
| Kontaktwiderstand(Ohm* $\text{cm}^2$ ) | 0,005         | Gesamtabschattung         | 3,98%  |
| I am Arbeitspunkt(A)                   | 33,5          | Fingerteilstückwiderstand | 0,08%  |
| U am Arbeitspunkt(V)                   | 0,5           | Vorderseitenbuswiderstand | ~      |
| Emitterschichtwiderstand(Ohm)          | 47            | Effizienz                 | 93,39% |
| Zusätzliche Abschattung(%)             | 50            |                           |        |
| Drahtdicke( $\mu\text{m}$ )            | 90            |                           |        |
| Lötunktastand(mm)                      | 10            |                           |        |
| Fingerstromabführung                   | beidseitig    |                           |        |

*Tabelle 4: Optimierte Zelle ohne zusätzlicher Abschattung und beidseitiger Stromabführung 9,20% Leistungssteigerung (in Bezug auf die standardkontaktierte Zelle)*

Theoretisch lässt sich bei auf Feindrahtkontaktierung optimierten Parametern, die Effizienz der Zellen relativ zum Standardverfahren, um bis zu 9,20% steigern.

Praktisch stellt sich die Frage, ob die optimierten Parameter verfahrenstechnisch mit solch geringen Ohmschen und Abschattungsverlusten wie berechnet umzusetzen sind bzw. überhaupt technisch umsetzbar sind. Eine beidseitige Stromabführung ist in der Modulfertigung aufwendiger umzusetzen, da der zu beiden Seiten abgeführte Strom wieder gesammelt werden muss. Lötunkte (beim Arbeiten mit zusätzlichem Lot) erzeugen Abschattung. Für die vorliegenden Versuchsreihen mit nicht optimierten Parametern ist an solche Leistungssteigerungen nicht zu denken, hier dienen eher die Tabellen 1 und 2 als Orientierung.

## 10 Die Versuchsaufbauten

Die Problemstellungen, die es bei den Versuchsaufbauten zu lösen gilt, werden hier kurz zusammengefasst.

Die Abschattung soll minimal gehalten werden. Für zusätzliche Abschattung sind einerseits die Feindrähte selbst verantwortlich, da es sehr schwierig ist alle 57 Drähte möglichst mit den Fingern deckungsgleich auf den Wafer zu löten. Andererseits ist beim Verlöten dieser ein Verschmutzungsrisiko bzw. zusätzliche Abschattung durch die Lötunkte (beim Arbeiten mit zusätzlichem Lot) gegeben.

Möglichst starke Haftung des Drahtes soll erreicht werden. Direkt auf Silizium kann mangels ausreichender Haftung nicht gelötet werden. Deswegen ist die Lötkontakfläche auf die übersinterten Bereiche beschränkt. Dort sind aber nur sehr kleine Lötunkte möglich. Der runde Querschnitt des Drahtes erzeugt nur eine sehr kleine Auflagefläche. Die Lötkontakflächen auf den schmalen Fingern sind sehr gering. Die Haftung leidet darunter. Schlecht haftende Lötunkte erhöhen zudem die Ohmschen Verluste.

Der Wafer soll unbeschädigt bleiben. Silizium ist ein sprödes Material. Die Anpressung des Drahtes beim Löten gefährdet den Wafer. Beim Löten wird der Wafer thermisch gestresst, was zu Spannungen im Material führt. Das Problem der unterschiedlichen linearen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und Kupfer erzeugt ebenfalls Spannungen. Die Gefahr von Zellbrüchen ist gegeben.

Der Aufwand bzw. die Komplexität soll möglichst gering sein. Der Kostenaufwand für die neue Methode in Bezug auf eine mögliche industrielle Umsetzung bliebe damit niedrig.

## 10.1 Das Flussmittel

Zu verlötende Flächen sind oft verschmutzt oder oxidiert oder oxidieren durch die Erwärmung beim Löten.

Flussmittel ist eine Zusatzsubstanz für den Lötvorgang. Es verbessert dabei einerseits die Fließigenschaften des Lots, macht es quasi dünnflüssiger. Andererseits reinigt Flussmittel die zu verlötenden Flächen von Verschmutzungen und reduziert Oxidschichten bzw. verhindert ihre Bildung auf den zu verlötenden Flächen.

Als Flussmittel bei den Lötungen wurde teilweise Isopropanol, teilweise eine fertige rückstandsfreie Flussmittelmischung (Kester SE-CURE 9650) verwendet. Die Flussmittelmischung verdampft bei Erwärmung langsamer als Isopropanol. Dies hat den Vorteil, dass das Flussmittel nicht schon vor dem Aufschmelzen des Lotes vollständig verdampft ist. Bei nicht ausreichend langer und hoher Erwärmung hinterlässt die Mischung jedoch Verschmutzungsrückstände.

## 10.2 Die Vorversuche

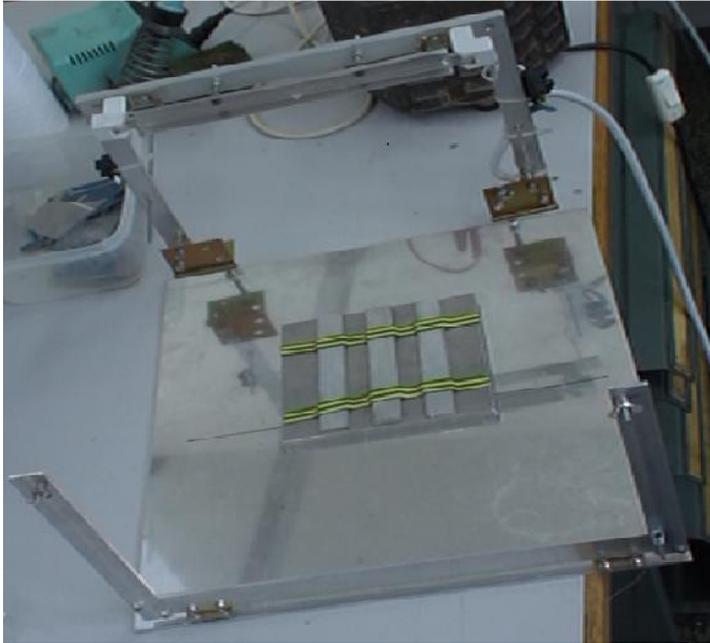
Im folgenden Kapitel werden die Vorversuche und die daraus gewonnenen wichtigen Erkenntnisse für die darauffolgenden Versuchsaufbauten erläutert. Es handelt sich hierbei um prinzipielle Versuche, eine haftende Verlötung zwischen Draht und Wafer herzustellen.

Ultraschalllötung ist ein Verfahren für die Verlötung schwer zu verlötender Materialien. Es ist möglich damit sogar auf Glas oder Keramik zu löten [45]. Lötversuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei zwei Wafern mittels Ultraschalllötung und zusätzlichem Lot in Form von Lötendraht führten zu keinem gewünschten Ergebnis. Ultraschall bedeutet eine zu hohe mechanische Belastung und führt zu Zellbrüchen bei den spröden Wafern. Dieses Verfahren eignet sich somit nicht für Wafer.

Manuelle Versuche mit einem gewöhnlichen handelsüblichen LötKolben nur mit der Eigenverzinnung des Drahtes blieben fruchtlos. Es stellte sich keine Haftung ein. Manuelle Versuche mit einem gewöhnlichen handelsüblichen LötKolben und zusätz-

lichem Lot in Form von Lötendraht erzielten teilweise Haftung, erzeugten aber sehr große Lötunkte und verschmutzten den Wafer durch Kolophonium. Lötendraht enthält in seinem Kern das Flussmittel Kolophonium, welches nicht rückstandsfrei verdampft und braune Flecken hinterlässt. Die maximal manuell zu erreichende Genauigkeit ist bei vorliegenden Größenverhältnissen (Fingerbreite: 160 $\mu$ m) unzureichend. Beim Arbeiten mit der Eigenverzinnung ist hohe Präzision nötig. Aufgrund der geringen Lotmenge mussten Wafer und Draht zum Erstarrungszeitpunkt erschütterungsfrei bzw. absolut unbewegt sein.

Um manuelle Ungenauigkeiten zu minimieren, wurde eine Einzeldrahtspannvorrichtung gebaut. Der Draht wurde auf den Bügel der Vorrichtung gespannt. Die mechanische Spannung des Drahtes ist durch eine Zugfeder justierbar bzw. reproduzierbar. Als Hitzequelle diente eine 1000W Halogenquarzröhre. Das Licht der Lötlampe wurde mit einem Reflektor fokussiert, um die notwendige Löttemperatur erreichen zu können. Die Lampe war über einen Transformator regulierbar. Der Wafer lag dabei auf einem Sockel. Lampe und Draht waren auf den Wafer durch Scharniere absenkbar. Dabei wurde jeweils ein Draht nur mit seiner Eigenverzinnung durch die Lampe gleichzeitig auf ganzer Länge auf einen Finger gelötet. Draht und Lampe waren dabei zueinander parallel. Der Draht wurde mit dem Bügel quasi auf den Wafer gelegt und nicht extra angepresst. Die Konstruktion bestand größtenteils aus Aluminium, da es leicht zu verarbeiten ist. In der Photovoltaikindustrie werden die Kupferbusse ebenfalls mit Lötlampen auf ganzer Länge auf die Busbars gelötet.



*Abbildung 35: Einzeldrahtspannvorrichtung mit Lötlampe und Spannbügel*

Einige Probleme traten auf. Die Hitzeentwicklung der Lampe war aufgrund der Fokussierung punktuell zu groß. Es musste auf genaue Lötleistungsregulierung und Lötzeiten geachtet werden. Beispielsweise entwickelte die Lampe bei unpassenden Parametern genug Hitze, um den Kupferkern des Drahtes zu deformieren (siehe Abbildung 36). Die Leistung der Lampe musste außerdem langsam hochgeregelt werden, um den Wafer nicht thermisch zu stressen.



*Abbildung 36: Deformierter Kupferfeindraht*

Bei der Erwärmung der Zelle entwickelte diese eine problematische Eigendynamik. Durch die verschiedenen aufgesinterten Kontaktierungsschichten und deren unterschiedlichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten krümmte sich der Wafer bei höheren Temperaturen. Eine Fixierung des Wafers ist notwendig.

Der Draht selbst entwickelte durch die Erhitzung auf ganzer Länge ebenfalls Eigendynamik. Die exakte Positionierung auf den Fingern wird dadurch erschwert.

Ein metallischer Sockel als Unterlage für den Wafer kühlt diesen stark. Aluminium ist ein ausgezeichneter Wärmeleiter mit hoher Wärmekapazität. Dies ist vor allem problematisch, sollte der Wafer nicht flächig aufliegen. Liegt er nur teilweise auf, kommt es zu einer unregelmäßigen Temperaturverteilung und einem großen Temperaturgradienten im Wafer. Zellbrüche sind die Folge. Abhilfe schafft eine isolierende Silikonmatte, die leider bei hohen Temperaturen selbst geringe Eigendynamik aufzeigt. Eine flächige Auflage des Wafers durch eine entsprechende Fixierung hilft ebenfalls.

Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden. Der Draht wird durch die Einzeldrahtspannvorrichtung nicht angepresst. Daher ist das Aufliegen des Drahtes auf dem Wafer auf ganzer Länge nicht gewährleistet. Minimale Unebenheiten verhindern teilweise den Kontakt zwischen Draht und Zelle. Ein gekrümmter Sockel biegt den Wafer bzw. zwingt ihm einen Radius auf. Die Drähte pressen sich somit aufgrund der mechanischen Drahtspannung gleichmäßig an den gekrümmten Wafer an. Eine Krümmung des Wafers führt aber bei gleichzeitiger Erhitzung allerdings oft zu Zellbrüchen. Da das einzelne Verlöten der Drähte aufwendig ist muss im nächsten Schritt eine Vorrichtung zum Löten mehrerer Drähte in einem Schritt konzipiert werden.

### 10.3 Der Spannrahmen

Um sämtliche Drähte einer Zelle in einem Vorgang löten zu können, wurde ein Spannrahmen konstruiert, der im Folgenden beschrieben werden soll.

Wichtig war dabei, dass jeder Draht parallel und äquidistant zu seinen beiden Nachbardrähten liegt. Der Abstand der Drähte sollte dem Fingerabstand entsprechen und justierbar bzw. kalibrierbar sein. Kernbestandteile des Spannrahmens waren zwei Kämmе (siehe Abbildung 37 die linke und rechte Parallelogrammseite) mit jeweils periodisch angeordneten Zinken. Über einen Zinken wurde jeweils ein Feindraht von einem Kamm zum anderen gespannt. Die beiden Kämmе bildeten die gegenüberliegenden Seiten eines Parallelogramms. Über die justierbaren Winkel des Parallelogramms ließ sich der Normalabstand der Drähte zueinander präzise einstellen bzw. dem Fingerabstand anpassen.

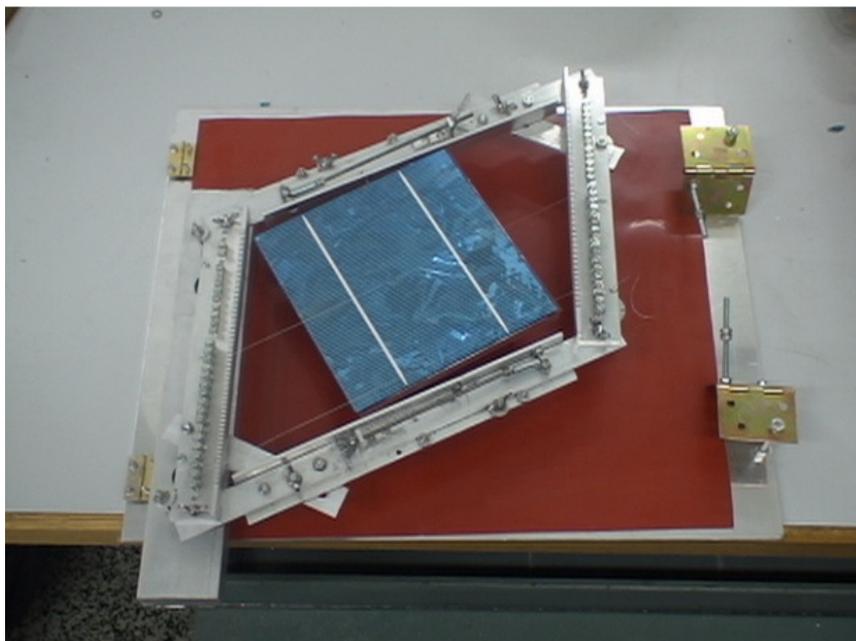
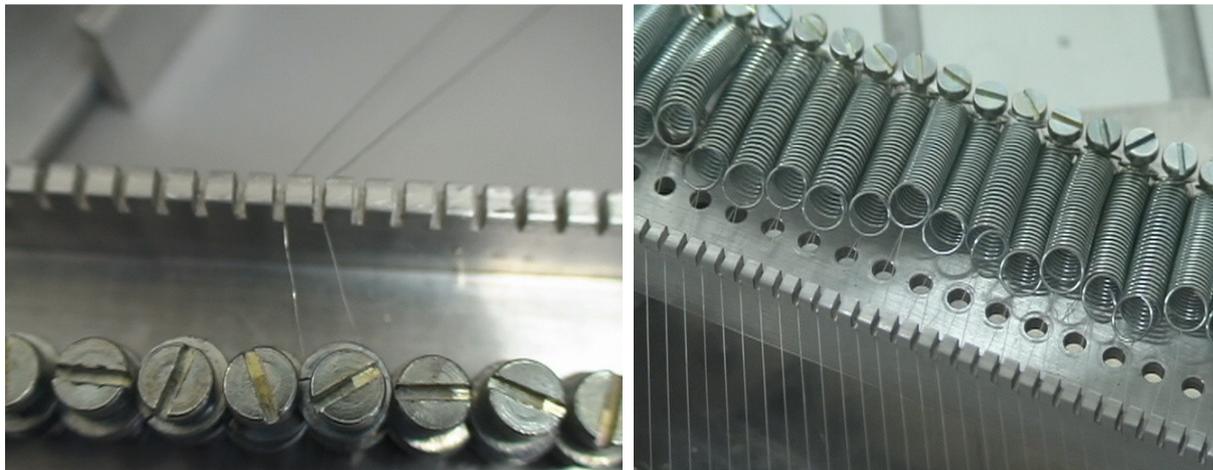


Abbildung 37: Spannrahmen mit Wafer

Dabei wurde für alle Finger nur ein langes Drahtstück verwendet. Es wurde auf einer Seite um eine Rolle direkt hinter den Kamm gelegt, dann über eine Kammzinke zu einer auf dem gegenüberliegenden Kamm befindlichen Zinke gespannt. Danach um eine Zugfeder direkt hinter dem anderen Kamm, hinter dem sich keine Rollen sondern Federn befinden, gelegt. Ein einziges langes Drahtstück wird quasi von Kamm zu Kamm und wieder zurück gespannt. Für die weiteren Versuche war die Richtung beim Lötens immer zu den Federn hin. Das gewährleistete, dass die noch zu verlötenden Teile der Drähte während des Lötens unter leichtem Zug standen und dadurch weniger verrutschten.

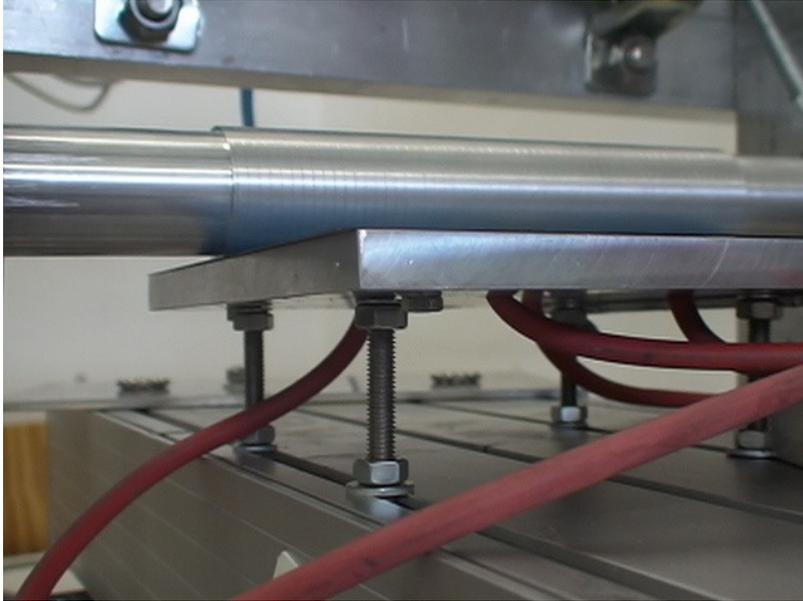


*Abbildung 38: Links und rechts die beiden Käme des Spannrahmens; Links mit Rollen rechts mit Federn*

Die beiden Parallelogrammseiten ohne Käme ließen sich über einen Schraubmechanismus stufenlos verlängern. Durch die Länge dieser Seiten war die mechanische Drahtspannung justierbar.

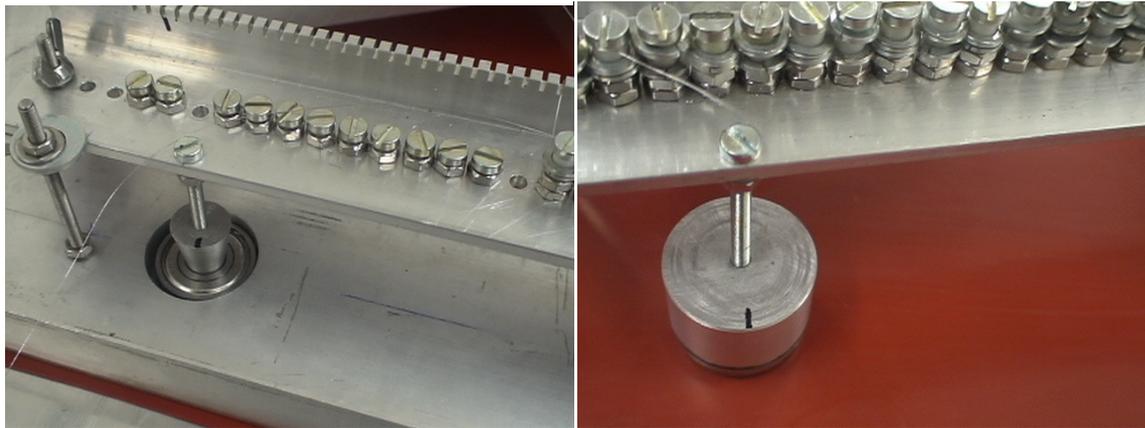
Nur ein Drahtstück für alle 57 Finger zu nehmen, reduzierte den Arbeitsaufwand drastisch gegenüber 57 Einzeldrähten. Nachteilig war, dass eine Feder Drähte für zwei Finger spannte. Sollten Probleme beim Verlötens auftreten, würde dies einen Nachbardraht in Mitleidenschaft ziehen.

Der Sockel für die weitem Versuchsaufbauten war mit einer Ansaugung versehen. Mit einer Wasserstrahlpumpe wurde zwischen Wafer und Sockel ein Vakuum erzeugt. Der Wafer lag dadurch plan auf. Er war somit ohne störende Halterung fixiert.



*Abbildung 39: Wafersockel mit Schläuchen für die Ansaugung*

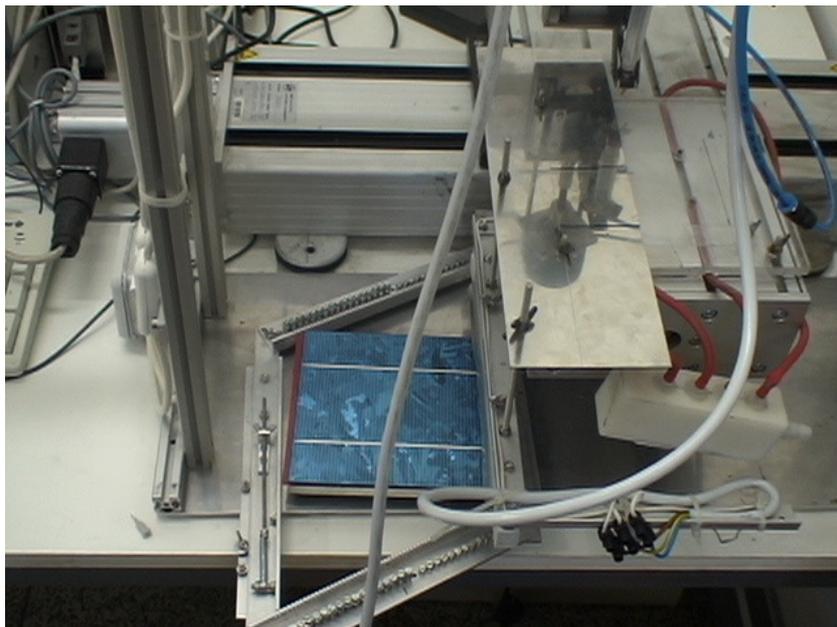
Der Spannrahmen bzw. die Drähte waren auf den Wafer stufenlos absenkbar. Der Rahmen stand für die meisten Versuche auf vier durch Schrauben einzeln höhenverstellbaren Beinen. Da der Rahmen in seiner Länge verstellbar war, waren zwei Beine einer Seite rollend gelagert. Die anderen beiden fixierten den Rahmen gegen Verrutschen. Diese zwei Beine waren kegelförmig und steckten im inneren Laufring eines Präzisionskugellagers. Der Rahmen war somit auch kippbar bzw. schräg zu stellen.



*Abbildung 40: Kegelförmiges höhenverstellbares Bein des Spannrahmens in einem Präzisionskugellager gelagert (links); zylinderförmiges höhenverstellbares Bein; der Zylinder steht auf Rollen (rechts)*

## 10.4 Lampenversuche

Zur Automatisierung und Präzisionierung wurde die Lötlampe auf einen automatischen Schlitten genannt xy-Tisch montiert. Der xy-Tisch bestand aus zwei Schlitten angetrieben von jeweils einem Schrittmotor. Die Schrittmotoren ermöglichten es die Lampe in der xy-Ebene auf  $25\mu\text{m}$  genau zu positionieren. Die Lampe fuhr während des Lötens mit der eingestellten Geschwindigkeit über den Wafer.



*Abbildung 41: xy-Tisch mit Lötlampe Wafer und Spannrahmen*

Verschiedene Variationen des Versuchsaufbaus wurden getestet.

Die Lampe beim Löten in paralleler Position zu den Fingern von Finger zu Finger fahren zu lassen, führte zu unzureichender Haftung. Wie bereits erwähnt erwärmte sich der Draht auf ganzer Länge und verlor häufig seine Positionierung über den Fingern.

Die Lampe normal zu den Fingern auszurichten und entlang der Finger fahren zu lassen, brachte eine Verbesserung. Versuche mit einer vertikalen oder horizontalen Meandering des Drahtes steigerten die Haftung des Drahtes. Vertikale Meandering erzielte deutlich bessere Ergebnisse. Sie reduzierte thermisch verursachte mechanische Spannung. Bei zwar geringerer zusätzlicher Abschattung stellte sich Haftung nicht in gewünschter Häufigkeit ein.

Die Meandering des Drahtes wurde folgendermaßen erreicht. Zuerst musste der Draht auf den Rahmen gespannt werden. Für horizontale Meandering (1cm Periode) war diese jedem Draht einzeln mit einer geriffelten Zange eingeprägt. Für vertikale Meandering (1,5mm Periode) wurde der bespannte Rahmen auf eine weiche Unterlage gelegt und mit einem geriffelten Roller überwalzt. Der Spannrahmen konservierte dabei die jeweilige Meanderingsebene für die Versuche. Die Amplitude der Meandering konnte über die mechanische Vorspannung des Drahtes eingestellt werden.

## 10.5 Die Lötwalze

Die Idee der Lötwalze war, direkt am bzw. etwas vor dem gerade erstarrenden Bereich des Lots beim Löten die Position des Drahtes zu fixieren. Dazu wurde eine Aluröhre mit 57 periodischen Rillen (Konstruktionsplan siehe Anhang) angefertigt. Aluminium ist leicht zu verarbeiten und verlötet aufgrund einer beständigen Oxidschicht nicht mit den Drähten. Dabei war der Rillenabstand so gewählt, dass er bei zirka 250°C dem Fingerabstand entsprach. 250°C war die geschätzte Temperatur der Walze beim Löten. Die Rillen wurden mit einem Gewindemesser geschnitten. Sie dienten als Führung für die Drähte beim Löten. Die Rillentiefe war so gewählt, dass der

Draht in den Rillen nicht vollständig versenkbar war. Die Rillen sollten im Querschnitt dreieckig mit  $60^\circ$  Öffnungswinkel (Konstruktionsplan siehe Anhang) sein, da sie mit einem entsprechenden Gewindemesser geschnitten wurden. Bei geringen Schnitttiefen in der Größenordnung von Zehntel mm ist der Rillenquerschnitt jedoch eher halbrund als dreieckig. Dies musste berücksichtigt werden, da die Drähte sonst zur Gänze in den Rillen liegen würden und somit keinen Kontakt mit dem Wafer beim Lötten hätten.



*Abbildung 42: Lötwalze mit Rillen zur Drahtführung*

Beim Lötten führte eine Rille jeweils einen Draht. Die Drähte waren dabei im Spannrahmen aufgespannt und lagen auf dem Wafer auf. Der Wafer ruhte auf einem Wafersockel mit Ansaugfixierung. Durch die Ansaugung wurde zwischen Wafer und Sockel mittels einer Wasserstrahlpumpe evakuiert. Der Sockel war fix auf dem xy-Tisch montiert. Beim Lötten bewegte sich der xy-Tisch linear und die Walze rollte über Drähte und Wafer und presste diese dabei aneinander. Die Walze wurde durch die Innenbohrung mit einem Heißluftgerät beheizt.

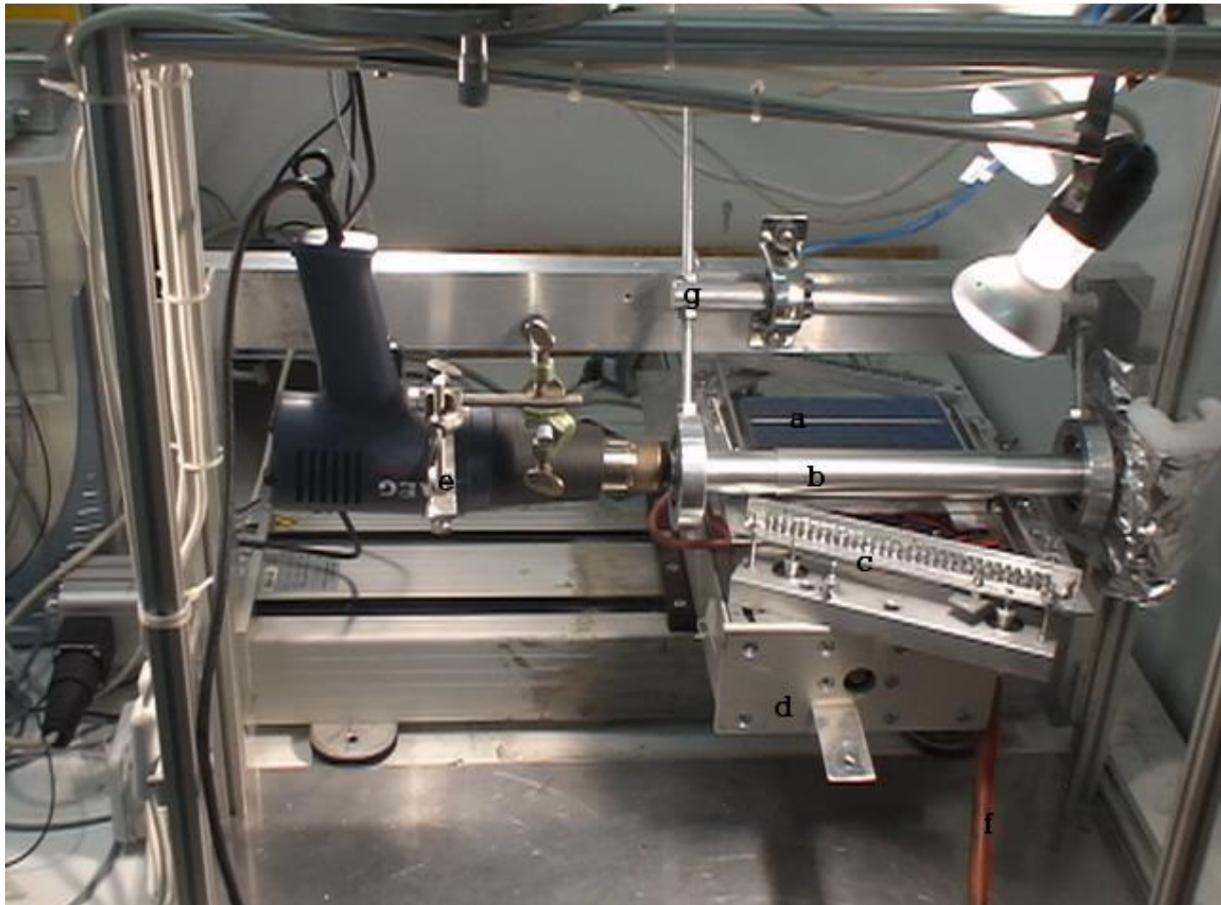


Abbildung 43: Versuchsaufbau für Lötung mit der Lötwalze; links im Bild das Heißluftgerät; Wafer auf Wafersockel mit Spannrahmen; a) Auf dem Wafersockel angesaugter Wafer, b) Lötwalze in zwei Kugellagern fixiert, c) Spannrahmen, d) xy-Schlitten, e) Heißluftgerät zur Beheizung der Walze, f) Ansaugschlauch für die Ansaugung mittels Wasserstrahlpumpe, g) schwenkbare Fixierung für die Walze

Es traten einige Probleme auf. Der Rillenabstand wurde anhand der Walzen-temperatur beim Löten mit dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium berechnet. Die optimale Temperatur der Walze beim Lötvorgang war schwierig abzuschätzen. Die Erwärmung der Walze war nicht völlig homogen, da sie einseitig beheizt wurde und von unten je nach Auflage und Benetzung mit Flußmittel gekühlt wurde. Es traten daher Ungenauigkeiten aufgrund einer teilweisen Veränderung der Periodizität der Rillen auf.

Die Walze musste beim Abrollen präzise die Spur halten. Sie war in Präzisionskugellagern gelagert, in deren Innenring sie steckte. Es waren keine Präzisionslager mit der gewünschten Arbeitstemperatur im Handel erhältlich. Ein normales Präzisions-

lager blockiert bei Erwärmung auf 250°C. Walze und innerer Laufring des Kugellagers erwärmen sich stärker als der äußere Laufring. Der äußere Laufring musste an einer Stelle durchtrennt, um sich dehnen zu können, und das Schmiermittel des Lagers gegen ein hitzebeständigeres ersetzt werden. Dies verringerte den Reibungswiderstand des Lagers. Die Leichtgängigkeit des Walzlagers war wichtig, da die Walze keinen eigenen Motor hatte. Sie wurde alleinig durch das Abrollen auf dem Wafer in Rotation versetzt. Blockierte die Walze, war eine Lötung nicht mehr möglich.

Die Walze wurde über die Lager, die an ihren Enden saßen, beim Löten angepresst. Im Lauf der Versuche verjüngte sie sich deswegen zur Mitte hin. Der Draht hatte aufgrund der Verzinnungsschicht, deren Dicke variierte, keinen gleichmäßigen Durchmesser. Damit trotzdem alle Drähte beim Löten Kontakt zum Wafer hatten, wurde mit vertikaler Meanderung (Periode 1,5mm) gearbeitet. Diese glich die Höhenunterschiede durch eine Federwirkung aus.

Beim Vorheizen der Walze erhitze sich auch der Wafer stark. Der Rahmen wurde leicht schräg gestellt. Dies verhinderte ein vorzeitiges Verlöten der Drahtabschnitte, die die Walze noch nicht überrollt hatte. Die Drähte wurden somit erst von der Walze auf den Wafer gedrückt.

Es erwärmte sich nicht nur die Walze sondern auch andere Teile des Versuchsaufbaus. Die thermische Ausdehnung verschiedenster Teile erschwerte präzises Löten.

Ein Wafer konnte nur abschnittsweise gelötet werden, da die Lötwalze nicht Spur hielt und zwischendurch kalibriert werden musste.

Einzelne Drähte rutschten oft aus den Rillen. Dies hob die Walze an und der Versuch musste wiederholt werden. Breitere Rillen mit stumpferem Öffnungswinkel hätten eventuell Abhilfe geschafft. Aufgrund dieser und andere Probleme wurde das Konzept der Walze nicht weiter verfolgt.

Die Lötung eines Wafers mit der Lötwalze war langwierig und komplex. Zellbrüche waren häufig. Von vielen Versuchen konnten zwei Zellen mit zufriedenstellendem Ergebnis hergestellt werden. Die Ergebnisse waren jedoch nur schwer reproduzierbar.

## 10.6 Der Lötstempel

Ein weiterer Ansatz war das Löten mit einem Hitzestempel. Der Lötstempel presste die Drähte an und verlötete sie gleichzeitig. Die Lötung erfolgte reihenweise, d.h. der Stempel stand beim Löten normal zu den Fingern. Der Spannrahmen wurde bei dieser Versuchsreihe um eine Drahtführung ergänzt. Diese fixierte die Drähte gegen seitliches verrutschen direkt neben der Lötung und musste für jede zu lötende Reihe neu positioniert werden. Die eigens angefertigte Drahtführung (siehe Abbildung 44 rechts) war ein Aluminiumstreifen mit 57 periodisch angeordneten Führungsrillen.

Der Lötstempel bestand aus einem Winkelprofilstück aus Aluminium. Es wurde im Ofen auf 450C° erhitzt und manuell auf die auf dem Wafer befindlichen Drähte gepresst. Vorteil dieser Methode war, dass angepresst wurde bis das Lot erstarrte. Zum Beispiel könnte beim Löten mit dem LötKolben der Draht durch das Ablösen verrutschen bevor das Lot erstarrt. Gelötet wurden neun Reihen zu jeweils 57 Lötunkten.



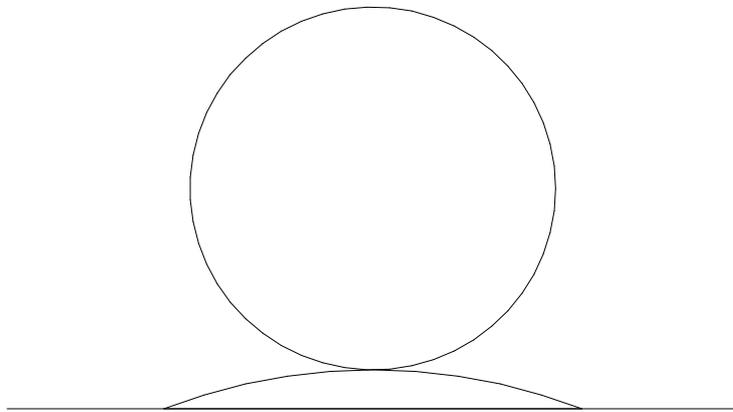
Abbildung 44: Lötstempel im Ofen (links); Drahtführung (rechts)

Durch das Anpressen entstanden teilweise Zellbrüche.

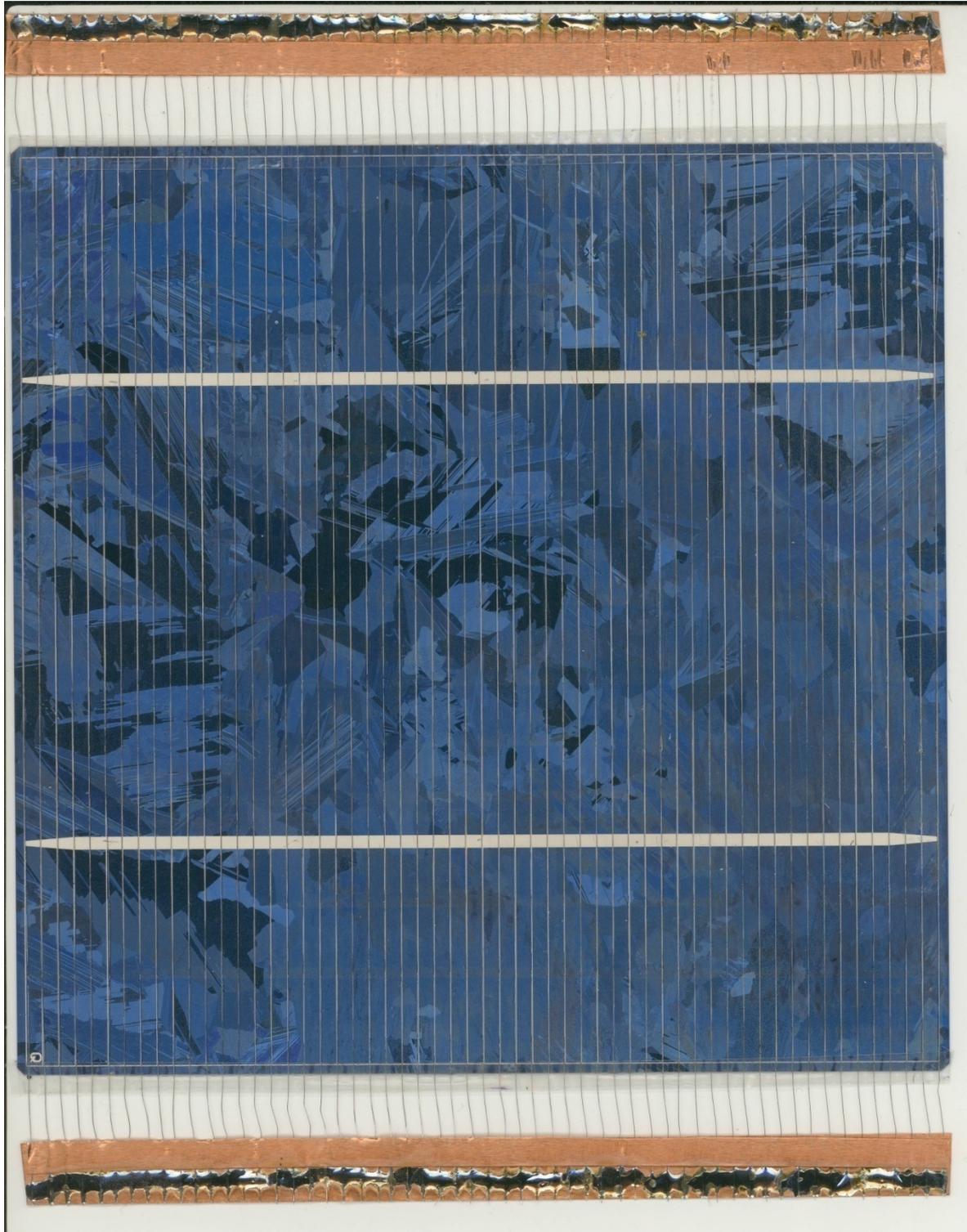
Es konnte eine Serie Zellen erfolgreich kontaktiert und vermessen werden. Die Haftungsrate der Lötunkte bei den Zellen lag bei zirka 70%. Allerdings waren die Lötungen empirisch als locker zu bezeichnen. Die letzten Lötunkte zu beiden Seiten der Zellen wurden deswegen mit hitzebeständigem, dünnem, transparentem Klebeband gesichert.

Die Drahtenden wurden zur weiteren Kontaktierung auf Kupferbänder gelötet (siehe Abbildung 46).

Es war zu beobachten, dass der Draht beim Anpressen eine Tendenz zum Verrutschen zeigte. Zurückzuführen ist diese wichtige Erkenntnis auf den Querschnitt der Finger. Er ist abgerundet. Die Sinterfinger sind darauf ausgelegt bei geringer Breite möglichst hoch zu sein. Durch das unvermeidbare, teilweise Verlaufen der Sinterpaste bildet sich beim Einsintern ein, einem halbrunden ähnelnder, Querschnitt. Den runden Draht mittig der Länge nach auf den Rücken der Finger zu pressen, ähnelt einem labilen Gleichgewicht.



*Abbildung 45: Schematische Darstellung des Feindrahts ( $r \sim 136 \mu\text{m}$ ) auf dem annähernd im Querschnitt halbrunden Finger ( $b \sim 160 \mu\text{m}$ ;  $h \sim 15 \mu\text{m}$ )*



*Abbildung 46: Mit dem Lötstempel feindrahtkontaktierte Zelle*

## 10.7 Versuche mit Lötpaste

Die Lötkontakfläche beim Löten nur mit der Eigenverzinnung des Drahtes war gering. Dies wirkte sich negativ auf die Haftung aus. Bei der diesem Kapitel zu Grunde liegenden Versuchsreihe wurde die Lotmenge durch Lötpaste ( $\text{Sn62Pb36Ag2}$ ) erhöht.

Aufgrund der größeren Lotmenge konnte auf ein Anpressen, das ein Verrutschen der Drähte bewirken kann, verzichtet werden. Es wurde der bespannte Rahmen nur aufgelegt.

Manuell wurden auf die Zellen neun Pastenspots pro Finger dispent. Wie bei den letzten Versuchsaufbauten wurde der Spanrahmen verwendet.

Gelötet wurde reihenweise direkt mit Heißluft. Es wurde dafür ein Heißluftgerät verwendet. Heißluft als Hitzequelle hat Vorteile gegenüber einer Lampe. Ein Überhitzen wie durch zu starke Fokussierung ist nicht möglich. Aufgrund der schlechten Wärmeleitung und niedrigen Wärmespeicherkapazität von Luft sind schockartige, partielle Erhitzungen des Wafers, wie z.B. beim Arbeiten mit dem Lötstempel, nicht möglich. Aus diesem Grund blieben Zellbrüche bei diesem Versuchsaufbau gering.

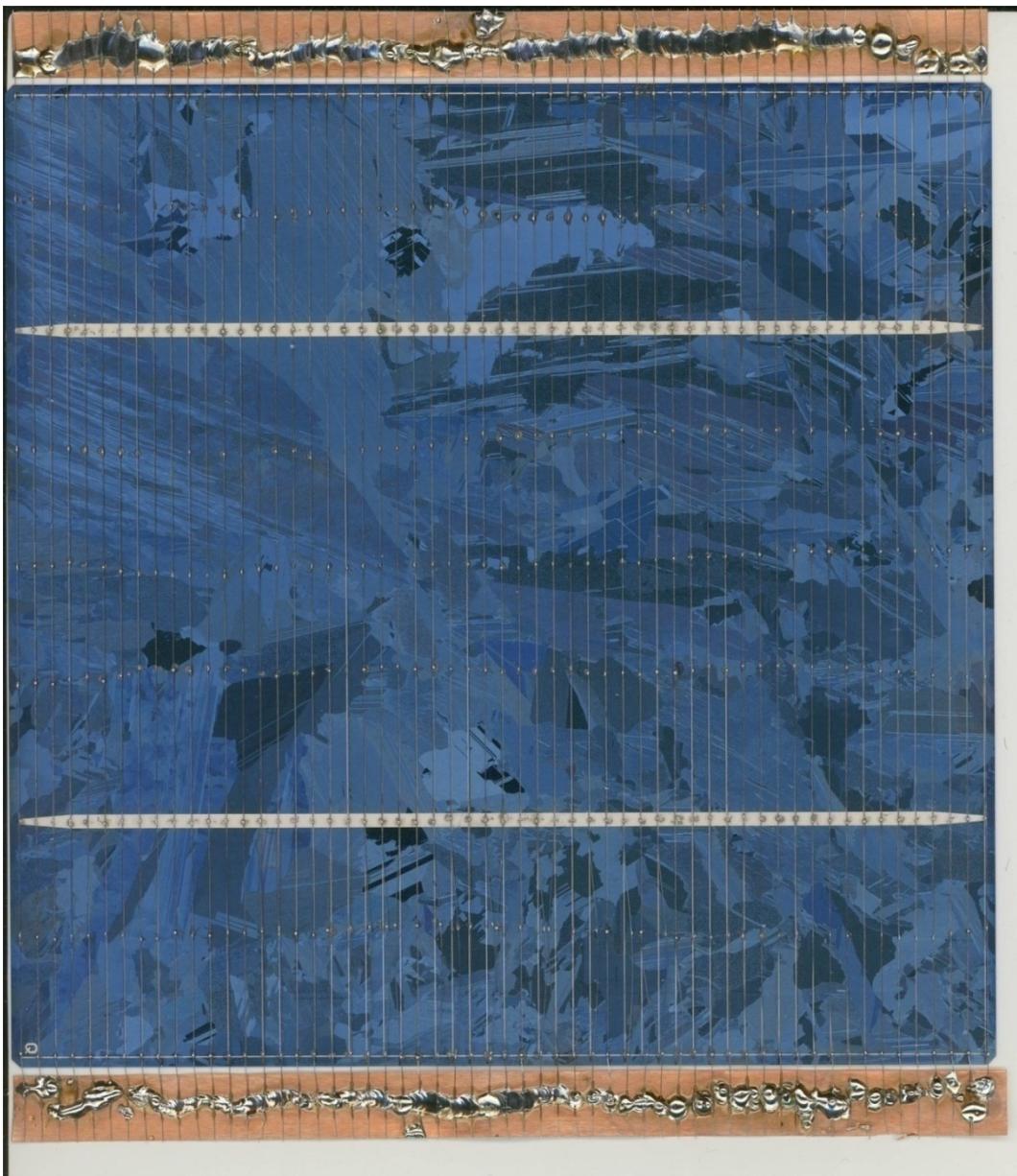
Nachteilig beim Arbeiten mit Heißluft war die schlechte Fokussierung. Zu große Areale der Zelle erwärmten sich. Bereits verlötete Bereiche mussten gegen Hitze abgeschirmt werden, um ein Auflöten zu verhindern. Der Spanrahmen musste gegen die heiße Abluft mit Wasser gekühlt werden.

Durch den schlechten Fokus erwärmte sich bei der Lötung eines Lötunktes ein zu langer Drahtabschnitt. Mechanische Spannungen beim Abkühlen waren die Folge.

Die Lötunkte hatten einen durchschnittlichen Durchmesser von 0,4mm. Über die Zelle bedeutete dies Abschattungsverluste von 0,25%. Die Ohmschen Verluste in den Lötunkten durch Kontaktwiderstände waren hier wie bei allen Testreihen mit Punktlötungen vernachlässigbar. Bei einer Optimierung auf das Arbeiten mit

zusätzlichem Lot, könnte die Verzinnungsschicht dünner ausgelegt werden, da sie nur mehr zum Korrosionsschutz dient. Dies würde die Leistung geringfügig steigern.

Die Kontaktierung einer Zelle erwies sich vor allem durch das Dispensieren von Hand als extrem zeitaufwendig (zirka 7 Stunden pro Zelle). Da sämtliche Testzellen aufgebraucht wurden, konnten nur wenige Zellen mit diesem letzten Versuchsaufbau hergestellt werden. Automatisiertes Dispensieren oder Siebdrucken der Lötpaste würde die Abschattung durch die Lötunkte und Verschmutzungen mit Lötpaste verringern.



*Abbildung 47: Mit dem Lötstempel gelötete feindrahtkontaktierte Zelle, welche zur weiteren Kontaktierung auf Kupferbänder aufgelötet werden.*

## 11 Auswertung der Versuchsreihe

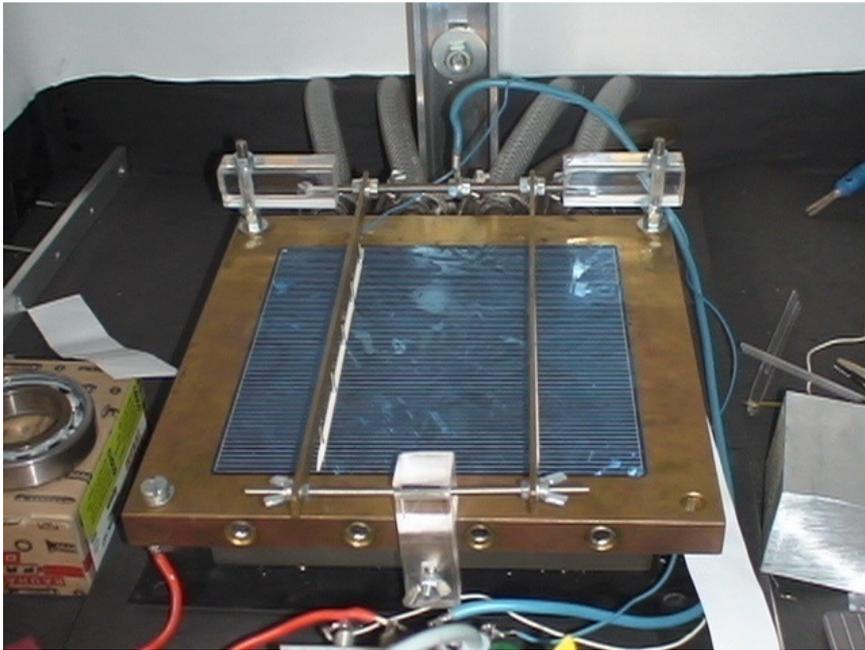


Abbildung 48: Messeinrichtung

Auf der obigen Abbildung ist die Messvorrichtung zu sehen. Die Messungen wurden mit fünf mit dem Lötstempel (Zellnummer: 1, 3, 4, 5, 9) und mit einer mit zusätzlicher Paste (Zellnummer: 12) punktgelöteten Zellen in Form von IV-Hellkennlinien durchgeführt. Sechs der ursprünglich zwölf für die Vermessung geplanten Zellen (Zellnummer: 2, 6, 7, 8, 10, 11) wiesen optisch erkennbare Zellbrüche auf. Dies wirkte sich teilweise (besonders wenn die gebrochenen Areale eher schlecht kontaktiert waren) deutlich in den Ergebnissen aus. Die Wafer wurden deshalb nicht berücksichtigt

Die Zellen wurden vor dem Feindrahtkontaktieren mit einer dem Standardverfahren ähnlicher Kontaktierungsweise über die Busbars kontaktiert und eine Referenzmessung wurde aufgenommen. Nach der Feindrahtkontaktierung wurden die Zellen nochmals vermessen. Bei 15°C, 25°C und 35°C wurden Hellkennlinien aufgezeichnet. Pro Zelle, Temperatur und Kontaktierungsmethode wurden jeweils drei von diesen aufgezeichnet (bei den Zellen 11 und 12 fünf). Dabei wurde der Strom jeweils ein- und beidseitig an den Kupferbändern abgenommen. Verluste in diesen

Bändern, die in einem Modul nicht auftreten würden, wurden rechnerisch berücksichtigt.

Die Hellkurven wurden bei einer Energiestromdichte die 86% von Am 1.5 entspricht aufgenommen. Die Vierpunktmessungen wurden softwaregestützt (Programm IV-Modul) ausgewertet. In die Messeinrichtung war zur Fixierung und zum besseren thermischen und elektrischen Kontakt während der Messung eine Ansaugung im Sockel implementiert. Die Rückseite wurde durch diesen metallenen Sockel vollflächig kontaktiert. Außerdem konnte der Wafer durch Wasserkühlung über den Sockel bzw. Heizung auf einer voreingestellten Temperatur gehalten werden.

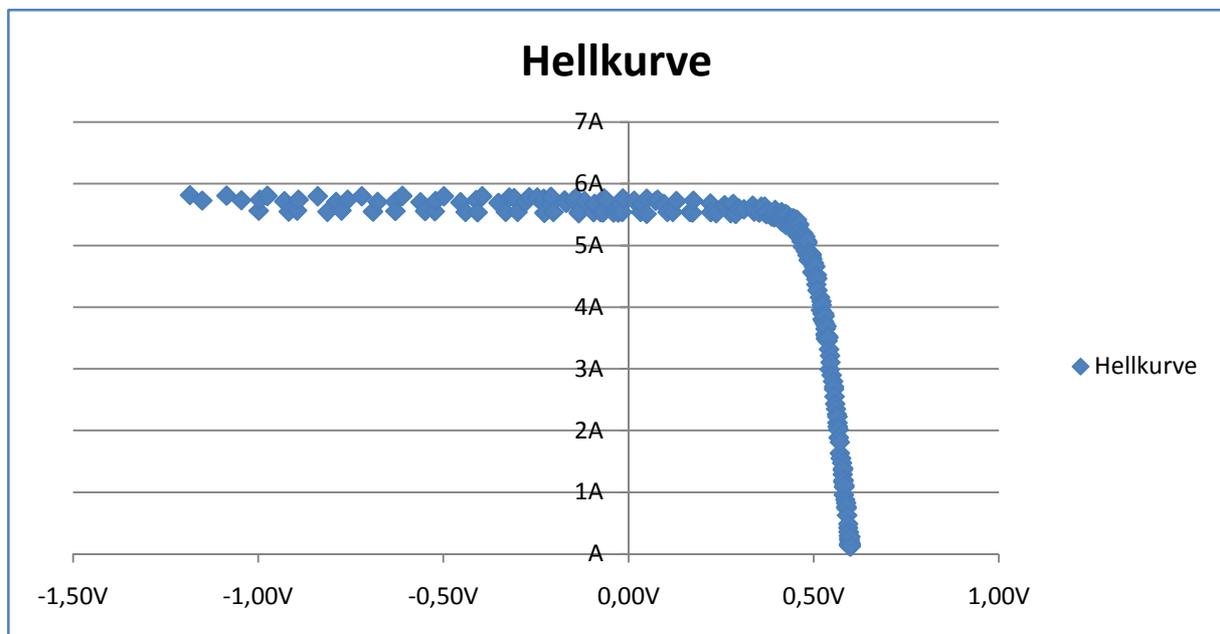


Abbildung 49: Hellkennlinie einer einseitig mit dem Lötstempel kontaktierten Zelle bei einer Temperatur von 25°C

Für jede nicht gebrochene mit dem Lötstempel kontaktierte Zelle wurden die Parameter Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ , Leerlaufspannung  $U_{OC}$ , serieller Widerstand  $R_s$ , paralleler Widerstand  $R_p$ , Füllfaktor FF und gemessene Leistung im Arbeitspunkt P einzeln wie folgt bei 25°C gemessen und ausgewertet. Die Auswertung erfolgte durch einen least square fit des Zwei-Diodenmodells (siehe Formel 11.1 und Abbildung 50) mittels des Programmes Modul Current. Dies bedeutet es wird die Kurve des Zwei-Diodenmodells gesucht, zu der die Messwerte die geringste Standardabweichung

haben. Das Zwei-Diodenmodell berücksichtigt neben seriellen und parallelen Widerständen Rekombination in der Raumladungszone.

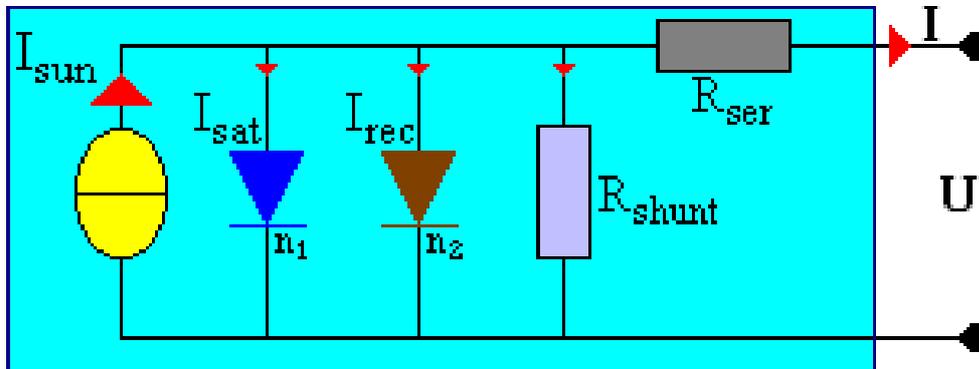


Abbildung 50: Darstellung des Zwei-Diodenmodells

$$I = I_{\text{sat}} \left[ e^{\frac{q(U+IR_{\text{ser}})}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{\text{rec}} \left[ e^{\frac{q(U+IR_{\text{ser}})}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{U+IR_{\text{ser}}}{R_{\text{shunt}}} \quad (11.1)$$

$I_{\text{SAT}}$ ...Sättigungsstrom

$I_{\text{REC}}$ ...Vorfaktor für Rekombinationsstrom

$R_{\text{SER}}$ ...serieller Widerstand

$R_{\text{SHUNT}}$ ...paralleler Widerstand

$n_1=1$

$n_2=2$

$q$ ...Einheitsladung

$k$ ...Boltzmannkonstante

$T$ ...absolute Temperatur

Nachfolgende Tabellen zeigen die Mittelwerte von jeweils drei Messungen.

|          | Standardkont. | einseitige Kont. | beidseitige Kont. |
|----------|---------------|------------------|-------------------|
| Isc(A)   | 5,94          | 5,69             | 5,84              |
| Uoc(V)   | 0,596         | 0,599            | 0,599             |
| Rs(mOhm) | 5,81          | 11,27            | 6,65              |
| Rp(Ohm)  | 16,75         | 19,67            | 17,41             |
| FF       | 75,38         | 70,64            | 73,21             |
| P(W)     | 2,63          | 2,41             | 2,49              |

Tabelle 5: Auswertung verschiedener Parameter für Zelle 1

|          | Standardkont. | einseitige Kont. | beidseitige Kont. |
|----------|---------------|------------------|-------------------|
| Isc(A)   | 5,88          | 5,64             | 5,73              |
| Uoc(V)   | 0,596         | 0,598            | 0,599             |
| Rs(mOhm) | 5,76          | 8,33             | 4,53              |
| Rp(Ohm)  | 18,31         | 30,81            | 21,43             |
| FF       | 74,5          | 73,19            | 75,78             |
| P(W)     | 2,46          | 2,47             | 2,6               |

Tabelle 6: Auswertung verschiedener Parameter für Zelle 3

|          | Standardkont. | einseitige Kont. | beidseitige Kont. |
|----------|---------------|------------------|-------------------|
| Isc(A)   | 6,13          | 6,11             | 6,12              |
| Uoc(V)   | 0,598         | 0,600            | 0,600             |
| Rs(mOhm) | 3,96          | 8,32             | 4,23              |
| Rp(Ohm)  | 28,81         | 26,64            | 39,38             |
| FF       | 75,54         | 73,78            | 76,06             |
| P(W)     | 2,77          | 2,65             | 2,79              |

Tabelle 7: Auswertung verschiedener Parameter für Zelle 4

|          | Standardkont. | einseitige Kont. | beidseitige Kont. |
|----------|---------------|------------------|-------------------|
| Isc(A)   | 6,05          | 5,92             | 5,97              |
| Uoc(V)   | 0,599         | 0,602            | 0,601             |
| Rs(mOhm) | 4,23          | 5,5              | 2,97              |
| Rp(Ohm)  | 15,88         | 17,89            | 15,14             |
| FF       | 76,84         | 76,18            | 77,58             |
| P(W)     | 2,79          | 2,71             | 2,79              |

Tabelle 8: Auswertung verschiedener Parameter für Zelle 5

|                       | Standardkont. | einseitige Kont. | beidseitige Kont. |
|-----------------------|---------------|------------------|-------------------|
| I <sub>sc</sub> (A)   | 6,1           | 5,87             | 5,9               |
| U <sub>oc</sub> (V)   | 0,599         | 0,602            | 0,601             |
| R <sub>s</sub> (mOhm) | 3,69          | 7,08             | 5,87              |
| R <sub>p</sub> (Ohm)  | 13,28         | 14,13            | 14,7              |
| FF                    | 75,58         | 74,16            | 75,12             |
| P(W)                  | 2,76          | 2,62             | 2,67              |

Tabelle 9: Auswertung verschiedener Parameter für Zelle 9

|                       | Standardkont. | $\sigma$ | einseitige Kont. | $\sigma$ | beidseitige Kont. | $\sigma$ |
|-----------------------|---------------|----------|------------------|----------|-------------------|----------|
| I <sub>sc</sub> (A)   | 6,02          | 1,57%    | 5,85             | 2,90%    | 5,91              | 2,19%    |
| U <sub>oc</sub> (V)   | 0,599         | 0,27%    | 0,600            | 0,28%    | 0,600             | 0,17%    |
| R <sub>s</sub> (mOhm) | 4,69          | 19,40%   | 8,1              | 23,38%   | 4,85              | 26,54%   |
| R <sub>p</sub> (Ohm)  | 18,61         | 28,79%   | 21,83            | 27,74%   | 21,61             | 42,56%   |
| FF                    | 75,53         | 0,99%    | 73,59            | 2,42%    | 75,55             | 1,88%    |
| P(W)                  | 2,69          | 4,68%    | 2,57             | 4,48%    | 2,67              | 4,20%    |

Tabelle 10: Auswertung verschiedener Parameter im Durchschnitt aller nicht gebrochener Zellen

Die durchschnittlichen Ergebnisse aus Tabelle 10 sollen nun diskutiert werden.

I<sub>sc</sub> sinkt bei einseitiger Kontaktierung um 2,95% und bei beidseitiger um 1,85% relativ zur Standardkontaktierung. Bei beidseitiger Kontaktierung und der Standardkontaktierung ist R<sub>s</sub> in etwa gleich wohingegen bei einseitiger Kontaktierung R<sub>s</sub> bedeutend größer ist. Somit sind die 1,85% erniedrigte I<sub>sc</sub> bei der beidseitigen Kontaktierung auf zusätzliche Abschattung durch die Drähte zurückzuführen. Nach den optischen Vermessungen zur Abschattung später in diesem Kapitel sollten diese I<sub>sc</sub> um etwa 2,19% in Relation zur Standardkontaktierung reduzieren.

R<sub>s</sub> steigt bei einseitiger Kontaktierung um 72,77% und bei beidseitiger nur um 3,44% in Relation zur Standardkontaktierung. Diese große Differenz erfordert theoretische Analyse, könnte auch mit teils schlechten Lötunkten zusammenhängen oder aber durch die große Varianz (siehe obige Tabellen) bedingt sein.

$U_{OC}$  zeigt sich unabhängig von der Kontaktierungsmethode konstant bei etwa 0,6V. Dies deutet darauf hin, dass sich  $R_p$  nicht leistungsrelevant geändert hat. Es sind keine Parallelwiderstände wie z.B. durch Durchsintern bzw. Durchlöten der Emitterschicht entstanden.

Wie zu erwarten zeigt sich kein unterschiedlicher Parallelwiderstand zwischen ein- und beidseitiger Feindrahtkontaktierung. Die Art der Stromabführung beeinflusst diesen Wert nicht.  $R_p$  steigt bei Feindrahtkontaktierung durchschnittlich um 16,71% gegenüber der Standardkontaktierung.

Die Ergebnisse zum Füllfaktor werden im folgenden Kapitel erläutert.

Folgende Tabelle stellt einen Vergleich der gemessenen Leistungssteigerungen zwischen der (einseitigen und beidseitigen) Feindrahtkontaktierung und der Standardkontaktierung bei 25°C dar. Eine vorläufige Auswertung der Ergebnisse wurde bereits in [41] publiziert. Hier wurden für eine andere Zellauswahl einseitig +0,49% und +4,1% beidseitig feindrahtkontaktiert relativ zur Standardkontaktierung gemessen.

| Zelltemperatur                  | 25°C  | $\sigma$ |
|---------------------------------|-------|----------|
| einseitig feindrahtkontaktiert  | 0,55% | 1,47%    |
| beidseitig feindrahtkontaktiert | 4,31% | 1,73%    |

*Tabelle 11: Durchschnittlich gemessene und ausgewertete Leistungssteigerungen der Feindrahtkontaktierung unbeschädigter mit dem Lötstempel hergestellter Zellen (Zellnummer: 1, 3, 4, 5, 9) gegenüber dem Standardverfahren bei 25°C mit dazugehöriger Standardabweichung*

|                           |        |       |        |       |         |
|---------------------------|--------|-------|--------|-------|---------|
| Zellnummer                | 1      | gbr.2 | 3      | 4     | 5       |
| einseitige Kontaktierung  | -2,21% | 0,03% | 0,66%  | 1,35% | 2,14%   |
| beidseitige Kontaktierung | 2,35%  | 3,99% | 5,16%  | 6,32% | 5,56%   |
| Zellnummer                | gbr.6  | gbr.7 | gbr.8  | 9     | gbr.10  |
| einseitige Kontaktierung  | -1,49% | ~     | -0,76% | 0,57% | -8,67%  |
| beidseitige Kontaktierung | 0,11%  | ~     | -4,64% | 2,12% | -11,02% |

Tabelle 12: Durchschnittlich, gemessene, korrigierte Leistungssteigerung aller mit dem Lötstempel hergestellten Zellen gegenüber der Standardkontaktierung bei 25°C; gbr....Zellbruch

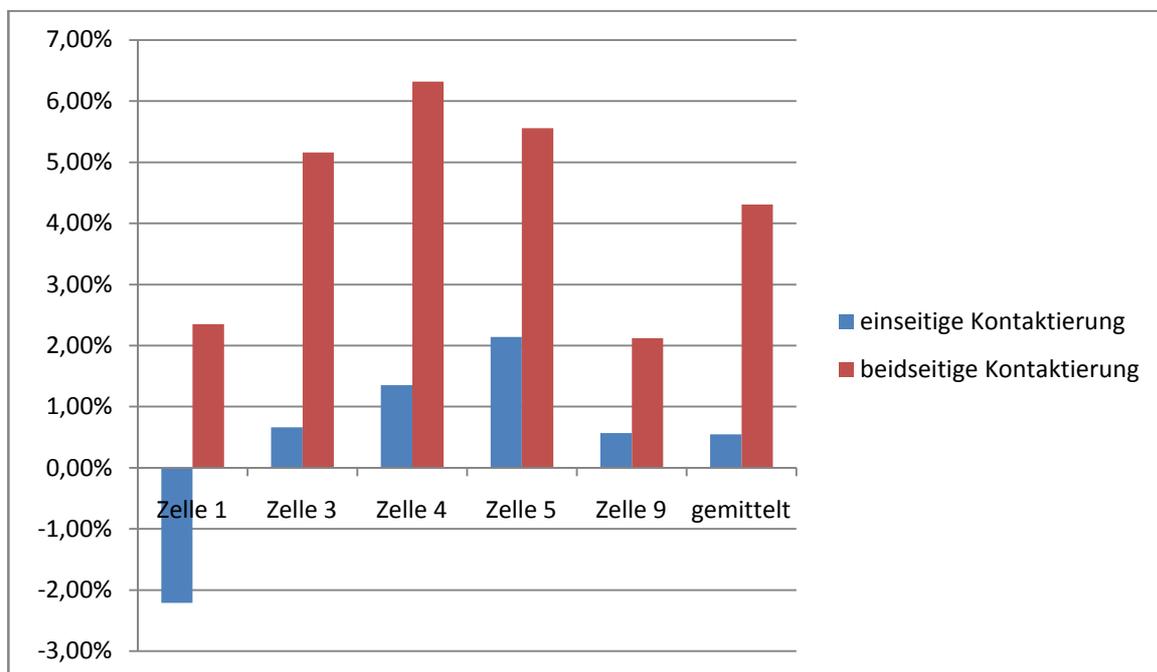


Abbildung 51: Darstellung der korrigierten Leistungssteigerungen in Relation zur Standardkontaktierung

Die Ergebnisse beziehen sich auf die mit dem Lötstempel kontaktierten Zellen (Rohdaten und Effizienzen im Einzelnen aller Zellen siehe Anhang Tabellen 14-21). Die durchschnittlichen Messergebnisse wurden dabei um die Abschätzung der bei der Feindrahtkontaktierung funktionslosen Busbars korrigiert. Verluste, die bei der Messung in den Kupfersammelbändern der Feindrähte, über die kontaktiert werden muss, auftreten, wurden ebenfalls rechnerisch berücksichtigt. Ein relativer Korrekturfaktor wurde jeweils für ein- und beidseitige Kontaktierung berechnet. Hierfür wurden die Ergebnisse der Vorabberechnungen zu Hilfe gezogen: Die Ohmschen Verluste in den Kupfersammlern wurden jeweils für ein- und beidseitige

Feindrahtkontaktierung prozentuell errechnet. Anhand der Vorabberechnungen wurden für die Kupferbusse bei der Standardkontaktierung die Ohmschen Verluste in diesen hinzu und bei der Feindrahtkontaktierung deren Abschattung abgerechnet und beide Werte in Relation gesetzt (Korrekturfaktor für relative Leistungssteigerung einseitig 5,94% und beidseitig 5,56%).

Vorausberechnet wären 3,15% Leistungssteigerung (bei 50% zusätzlicher Abschattung durch die Feindrähte) gegenüber der Standardkontaktierung bei einseitiger Stromabführung gewesen. Bei beidseitiger wären es 3,69% Leistungssteigerung (bei 50% bis 0% zusätzlicher Abschattung durch die Feindrähte) gegenüber der Standardkontaktierung gewesen. Könnte man ohne zusätzlich Abschattung kontaktieren wären einseitig 6,7% und beidseitig 7,24% Leistungssteigerung möglich, dies ist bei hochpräziser Verarbeitung nicht unrealistisch. Bei einer Optimierung der Parameter Drahtdicke, Fingerabstand und Fingerdicke wäre eine weitere Steigerung der Ergebnisse möglich (siehe Kapitel 9).

Allerdings sind die angestrebten Werte bei einseitiger Kontaktierung bei weitem nicht erreicht worden. Die geringere gemessene und korrigierte Effizienz ist vor allem auf die höhere Mehrabschattung durch die Feindrähte zurückzuführen. Diese basiert unter anderem auf nicht Deckungsgleichheit von Feindrähten und Sinterfingern, Verschmutzungen durch Lot und Flussmittel, und dem minimal abschattenden transparenten Klebeband zur Sicherung der Drahtenden. Durch eine Lötspunkt-haftungsrate (durch Zählung an gebrochenen Zellen erhoben) von 70% waren auch die Ohmschen Verluste in den Fingerteilstücken weitaus höher einzuschätzen als rechnerisch prognostiziert. Dies ist ein Grund für die größer als erwarteten Unterschiede zwischen einseitiger und beidseitiger Kontaktierung. Die nicht haftenden Lötspunkte sind nach Beobachtung nicht gleichmäßig verteilt. Oft waren mehrere Lötspunkte hintereinander missglückt. Dies verstärkt die Ohmschen Verluste, in stärkerem Maß bei einseitiger als bei beidseitiger Feindrahtkontaktierung.

Es soll nun jeweils eine Abschätzung für die vermehrten Fingerteilstückverluste durch nicht haftende Lötunkte gemacht werden. Zuerst sollen die minimalen Verluste abgeschätzt werden. Ausgangspunkt hierfür ist die Annahme der absoluten Gleichverteilung der nicht haftenden Punkte. Dies bedeutet, neben jedem nicht haftenden Lötunkt befinden sich zwei haftende. Wie bereits erläutert zeigt der Lötunktabstand eine quadratische Abhängigkeit zu den Verlusten in den Fingerteilstücken. In diesem Fall bedeuten 30% nicht haftende Lötunkte eine Verdopplung des Lötunktabstandes für 30% der Zellfläche. Somit addieren sich die minimalen Verluste aus 70% der normalen Verluste aus den Fingerteilstücken plus 30% der vierfachen normalen Verluste in den Fingerteilstücken. Dies bedeutet einen minimalen Zuwachs von 90% zu normalen Verlusten in den Fingerteilstücken durch nicht haftende Lötunkte.

Für die maximalen Verluste in den Fingerteilstücken wird angenommen, dass jeweils ganze Finger (unter der Annahme, dass jeder nicht haftende Finger durch zwei haftende benachbart wird) nicht durch Lötunkte kontaktiert sind sondern nur an vier Stellen durch Sinterungen. Zweimal aufgrund der Sinterbusse und zweimal an den Enden der Finger durch die Sinterverbindung zu den Nachbarfingern. Dies bedeutet 30% der Zelle haben Verluste in den Sinterfingern wie bei der Standardkontaktierung. Die maximalen Verluste addieren sich aus 70% der normalen Verluste aus den Fingerteilstücken plus 30% der Verluste in den Fingern wie bei der Standardkontaktierung. Bei 30% nicht haftender Drähte tragen diese auch nicht zur Kontaktierung bei d.h. die Verluste in den Drähten erhöhen sich, was ebenfalls berücksichtigt wurde. Die Verteilung der nicht haftenden Lötunkte wurde allerdings nicht untersucht.

Die Verluste in den Fingerteilstücken beim vorliegenden Fingerteilstückabstand von 1cm sind (siehe Kapitel 8.5) im Verhältnis zu den Verlusten einer standardkontaktierten Zelle 0,04% bei 100% Lötpunkthaftungsrate. Bei 70% Lötpunkthaftungsrate liegen die Verluste in den Fingerteilstücken zwischen 0,08% und 1,034% im Verhältnis zu den Verlusten einer standardkontaktierten Zelle.

## 11.1 Messungen des Füllfaktors

Für die effiziente Gewinnung elektrischer Energie aus einer Solarzelle ist die Leistungsabnahme durch die Wahl des optimalen Arbeitswiderstandes zu maximieren. Dieser entspricht dem Verhältnis  $U_m/I_m$ , wobei  $U_m$  und  $I_m$  die Spannung und der Strom im optimalen Arbeitspunkt sind. Der so genannte Füllfaktor ist ein Kennzeichen für die Güte einer Solarzelle. Er errechnet sich aus der maximalen Leistungsabnahme, Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom wie folgt. Es gilt [47]:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}} \quad (11.1)$$

FF...Füllfaktor

$U_m$ ...Spannung im optimalen Arbeitspunkt

$I_m$ ...Strom im optimalen Arbeitspunkt

$U_{oc}$ ...Leerlaufspannung

$I_{sc}$ ...Kurzschlussstrom

In tabellarischer Form folgen durchschnittliche Messergebnisse des Füllfaktors. Die Testzellen bis Nummer 10 wurden mit dem Lötstempel ohne zusätzliches Lot hergestellt. Bei Zelle 11 und 12 wurde die Lotmenge punktweise durch Lötpaste erhöht und mit einem Heißluftgerät gelötet (wobei Zelle 11 Zellbrüche aufwies). Für die Messung wurde eine Hellkurve aufgenommen und softwaregestützt (Programm: Modul Current) ausgewertet.

| Testzelle                 | 1     | 3     | 4     | 5     | 9     | 12    | ∅     |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Standardkontaktierung     | 0,744 | 0,745 | 0,755 | 0,769 | 0,754 | 0,748 | 0,758 |
| einseitige Kontaktierung  | 0,703 | 0,732 | 0,738 | 0,745 | 0,742 | 0,769 | 0,742 |
| beidseitige Kontaktierung | 0,732 | 0,758 | 0,761 | 0,781 | 0,761 | 0,769 | 0,755 |

*Tabelle 13: Durchschnittliche Messergebnisse des Füllfaktors unbeschädigter Zellen bei 25°C°*

Deutlich erkennbar beim Füllfaktor ist der Vorteil der beidseitigen Kontaktierung im Vergleich zur einseitigen.

## 11.2 Weitere Messergebnisse

Bei den durchgeführten Versuchen besteht das größte Potential für mögliche Verbesserungen in der zusätzlichen Abschattung durch die Feindrähte. Dieses Potential könnte durch eine weitere Präzisionierung durch Automatisierung ausgeschöpft werden. Für die mit dem Lötstempel hergestellten Testzellen wurde diese zusätzliche Abschattung durch die Feindrähte vermessen. Diese betrug ca. 31% der Abschattung der Sinterfinger. In Prozent der Gesamtleistung einer Zelle ohne Verluste der Frontseite war dies 1,87%, was bedeutet 1,87% der Zelloberfläche wurden zusätzlich durch die Drähte abgeschattet. In Prozent Leistung einer standard-kontaktierten Zelle waren dies 2,19%. Bei diesem Wert handelt es sich um einen groben Richtwert. Die Messung wurde durch Einscannen der Zelloberfläche mit einem Scanner durchgeführt. Dabei wurde anhand der Graustufen des eingescannten Bitmapfiles ausgewertet. Die Graustufen von Feindrähten und Sinterfingern fielen in den selben Bereich. Wobei beide heller sind als der Rest der Zelle. Somit konnte für die Auswertung ein Cutoff gesetzt werden. Mit den kumulierten Flächenanteilen der Graustufen über dem Cutoff von Zellen mit und ohne Feindrähten, ließ sich die gesuchte zusätzliche Abschattung errechnen.

Der Kontaktwiderstand zwischen Feindraht und Sinterfingern in den Lötunkten wurde ebenfalls vermessen. Gemessen wurden mit dem Lötstempel produzierte Lötunkte mittels einer Vierpunktmessung. Ein Punkt hat im Durchschnitt einen Kontaktwiderstand von  $25\text{m}\Omega$ . Bei 513 quasi parallelen geschalteten Kontaktwiderständen pro Zelle entstehen durch diese nur minimalste Verluste. Für Punkte, die mit zusätzlichem Lot hergestellt wurden, ergaben sich bei Messungen keine signifikanten Unterschiede. Insgesamt berechnen sich diese Verluste wie folgt.

$$P_{\text{kont}} = 513 I_{\text{kont}}^2 R_{\text{kont}} \quad (11.2)$$

Dies ergibt relative Verluste in der Höhe von 0,0068% (in Bezug auf eine Zelle ohne Verluste der Frontseite) bzw. 0,0028W absolute Verluste.

## 12 Fazit

Retrospektiv ist als vielversprechendster Versuchsaufbau die punktweise Lötung mit Lötpaste anzusehen. Die Haftungsrate ist mit großer Wahrscheinlichkeit durch eine besser fokussierende Hitzequelle zu erhöhen. Dafür in Betracht zu ziehen ist Heißluft, aus sehr kleinen Düsen geblasen, und eventuell die Abluft nach dem Löten abzusaugen. Andererseits könnte auch mit Laser gelötet werden. Möglicherweise würde auch eine punktweise Fokussierung von inkohärentem Licht genügen.

Als kritischster Parameter für gute Haftung und damit einem gelingenden Versuch ist die Durchschnittstemperatur des Drahtes  $T_{Dr}$ , zwischen zwei Lötunkten beim Erstarren zu betrachten. Je höher diese ist desto höher ist die mechanische Spannung von Draht und Zelle nach dem Abkühlen.

Positiv auf  $T_{Dr}$  wirken folgende Punkte:

- Es ist vorteilhaft immer einen Lötunkt eines Drahtes nach dem anderen zu Löten.
- eine gut fokussierte Hitzequelle
- je größer der Abstand zwischen zwei Lötunkten desto niedriger  $T_{Dr}$
- Lot mit niedrigem Schmelzpunkt

Zu beachten sei folgendes Gedankenexperiment zum Lötunktabstand und  $T_{Dr}$ . Lässt man den Drahtabschnitt zwischen einem Lötunkt und dem nächsten infinitesimal klein werden, hat dieser beim Erstarren dieselbe Temperatur wie der benachbarte Lötunkt. Somit ist  $T_{Dr}$  gleich der dem Schmelzpunkt des Lots. Dies ist bei einer durchgängigen Lötung auf ganzer Linie der Fall.

Eine vertikale Meandering reduziert die mechanische Spannung. Sie ist jedoch schwierig herzustellen und in den Lernprozess zu integrieren. Oft kippt die Meanderingsebene und erzeugt dadurch Mehrabschattung.

Eine Anpressung des Drahtes auf den Finger längs zu diesem kann zum Verrutschen von diesem führen. Grund dafür ist der halbrunde Querschnitt der Finger.

Da bei der Feindrahtkontaktierung die Sinterfinger viel weniger Auswirkung auf die Verluste haben, ist an dünnere, niedrigere Finger bei einem auf Feindrahtkontaktierung optimiertem Fingergrid zu denken.

Nur mit der Eigenverzinnung der Drähte zu löten, ist in Bezug auf die Haftung schwierig. Verwenden von zusätzlichem Lot in Form von Lötpaste stellt eine große Verbesserung dar.

Ein auf Feindrahtkontaktierung mit Lötpaste optimiertes Fingergrid könnte wie folgt aussehen. Die Finger sollten flach sein, dies vereinfacht das Löten bzw. steigert die Präzision. Die Finger sollten schmaler als die Drähte sein, sodass die Drähte die Finger zu 100% abdecken. Verbreiterte Spots auf den Sinterfingern unter den Lötunkten für das Dispensieren oder Siebdrucken von Lötpaste würden die Haftung der Lötunkte verbessern. Die Parameter Drahtdicke und Fingerabstand könnten ebenfalls auf Effizienz getrimmt werden.

Beidseitige Stromabführung verringert wie erwartet die Ohmschen Verluste.

Eine weitere Erkenntnis der Versuche: Löten mit Heißluft schont den Wafer und minimiert Zellbrüche, da der Wafer anders als beispielweise bei einer fokussierten Lichtquelle maximal die Heißlufttemperatur annehmen kann.

Wie aus Tabelle 11 ersichtlich, lässt sich durch die Feindrahtkontaktierung die Leistung gegenüber der einer standardmäßigen Kontaktierung steigern. Die für eine mögliche industrielle Umsetzung eher geeignete einseitige Stromabführung erreicht schon eine Leistungssteigerung von 0,55% gegenüber dem Standardverfahren. Diese ist durch Verbesserungen und Optimierungen des Verfahrens sicherlich ausbaufähig. Indiziert wird dies durch die weitaus höheren Leistungen bei der beidseitigen Stromabführung. Allerdings sind bei den verschiedenen getesteten manuellen und halbautomatischen Lötmethoden die Zellbruchraten noch sehr hoch.

Noch nicht erwähnt wurden folgende Aspekte:

-Bei schrägem Lichteinfall vergrößert sich der durch die Drähte bzw. deren Höhe abgeschattete Bereich. Deswegen wäre für feindrahtkontaktierte Module die relative Himmelsausrichtung zu der Fingerausrichtung günstig zu wählen. Der jahreszeitliche und tageszeitliche Einfallswinkel ist in Bezug auf die Einstrahlungsleistung zu betrachten. Nachgeführte Systeme stellen in Bezug auf diesen Aspekt jedoch keinen Nachteil für feindrahtkontaktierte Module dar.

-Kommt es in einem Modul zu Zellbrüchen sind die abgebrochenen Zellabschnitte durch die vielen Feindrähte noch immer kontaktiert. Bei der Standardkontaktierung mit zwei Bussen wirken sich Zellbrüche viel stärker negativ auf die Effizienz aus.

Hauptansatzpunkt für weitere Verbesserung des Verfahrens stellt nach Meinung des Autors Lötten mit einer gut punktwise fokussierten Lichtquelle dar. Die große Diskrepanz der Leistungssteigerung zwischen ein- und beidseitiger Feindrahtkontaktierung legt hohe Ohmsche Verluste aufgrund schlecht haftender Lötunkte durch mechanische Spannungen verursacht nahe. Dies wird auch durch die vielen feinen Zellbrüche untermauert. Punktweises Lötten verringert  $T_{Dr}$  und somit die Ursache der mechanischen Belastungen.

## 13 Anhang

|                           |       |       |       |       |        |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Zellnummer                | 1     | gbr.2 | 3     | 4     | 5      |
| Standardkontaktierung     | 2,63W | 2,69W | 2,61W | 2,77W | 2,79W  |
| einseitige Kontaktierung  | 2,43W | 2,54W | 2,48W | 2,65W | 2,69W  |
| beidseitige Kontaktierung | 2,55W | 2,65W | 2,60W | 2,79W | 2,79W  |
| Zellnummer                | gbr.6 | gbr.7 | gbr.8 | 9     | gbr.10 |
| Standardkontaktierung     | 2,71W | 2,76W | 2,69W | 2,76W | 2,61W  |
| einseitige Kontaktierung  | 2,52W | ~     | 2,52W | 2,62W | 2,25W  |
| beidseitige Kontaktierung | 2,57W | ~     | 2,43W | 2,67W | 2,20W  |

*Tabelle 14: Durchschnittliche, gemessene, unkorrigierte Leistung im Arbeitspunkt aller mit dem Lötstempel hergestellten Zellen bei 25°C; gbr....Zellbruch*

|                           |        |       |        |       |         |
|---------------------------|--------|-------|--------|-------|---------|
| Zellnummer                | 1      | gbr.2 | 3      | 4     | 5       |
| einseitige Kontaktierung  | -2,21% | 0,03% | 0,66%  | 1,35% | 2,14%   |
| beidseitige Kontaktierung | 2,35%  | 3,99% | 5,16%  | 6,32% | 5,56%   |
| Zellnummer                | gbr.6  | gbr.7 | gbr.8  | 9     | gbr.10  |
| einseitige Kontaktierung  | -1,49% | ~     | -0,76% | 0,57% | -8,67%  |
| beidseitige Kontaktierung | 0,11%  | ~     | -4,64% | 2,12% | -11,02% |

*Tabelle 15: Durchschnittlich, gemessene, korrigierte Leistungssteigerung aller mit dem Lötstempel hergestellten Zellen gegenüber der Standardkontaktierung bei 25°C; gbr....Zellbruch*

|                           |              |          |             |          |              |          |
|---------------------------|--------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|
| Zellnummer                | gbr.(15°C)11 | (15°C)12 | gbr(25°C)11 | (25°C)12 | gbr.(35°C)11 | (35°C)12 |
| Standardkontaktierung     | 2,84W        | 2,75W    | 2,77W       | 2,64W    | 2,71W        | 2,56W    |
| einseitige Kontaktierung  | 2,80W        | 2,70W    | 2,73W       | 2,65W    | 2,64W        | 2,57W    |
| beidseitige Kontaktierung | 2,77W        | 2,83W    | 2,65W       | 2,76W    | 2,70W        | 2,70W    |

*Tabelle 16: Durchschnittliche, gemessene, unkorrigierte Leistung im Arbeitspunkt aller mit zusätzlicher Lötpaste hergestellten Zellen bei 15°C, 25°C und 35°C; gbr....Zellbruch*

|                           |              |          |             |          |              |          |
|---------------------------|--------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|
| Zellnummer                | gbr.(15°C)11 | (15°C)12 | gbr(25°C)11 | (25°C)12 | gbr.(35°C)11 | (35°C)12 |
| einseitige Kontaktierung  | 4,70%        | 3,90%    | 4,19%       | 6,56%    | 3,25%        | 6,34%    |
| beidseitige Kontaktierung | 2,78%        | 8,77%    | 0,91%       | 10,51%   | 4,92%        | 11,12%   |

*Tabelle 17: Durchschnittliche, gemessene, korrigierte Leistungssteigerung aller mit zusätzlicher Lötpaste hergestellten Zellen gegenüber der Standardkontaktierung bei 15°C, 25°C und 35°C; gbr....Zellbruch*

| Zellnummer                | gbr.6 | gbr.8 | 9     | gbr.10 | gbr.11 | 12    |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Standardkontaktierung     | 2,78W | 2,76W | 2,80W | 2,68W  | 2,86W  | 2,75W |
| einseitige Kontaktierung  | 2,59W | 2,57W | 2,69W | 2,33W  | 2,81W  | 2,70W |
| beidseitige Kontaktierung | 2,64W | 2,68W | 2,75W | 2,44W  | 2,77W  | 2,82W |

*Tabelle 18: Durchschnittliche, gemessene, unkorrigierte Leistung im Arbeitspunkt mit dem Lötstempel hergestellter Zellen bei 15°C; gbr...Zellbruch; Auswertung der defekten Zelle 7 nicht möglich*

| Zellnummer                | gbr.6 | gbr.8 | 9     | gbr.10 | gbr.11 | 12    |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| Standardkontaktierung     | 2,69W | 2,62W | 2,65W | 2,55W  | 2,71W  | 2,56W |
| einseitige Kontaktierung  | 2,45W | 2,49W | 2,54W | 2,10W  | 2,64W  | 2,57W |
| beidseitige Kontaktierung | 2,51W | 2,49W | 2,60W | 2,32W  | 2,72W  | 2,70W |

*Tabelle 19: Durchschnittliche, gemessene, unkorrigierte Leistung im Arbeitspunkt mit dem Lötstempel hergestellter Zellen bei 35°C; gbr...Zellbruch; Auswertung der defekten Zelle 7 nicht möglich*

| Zellnummer                | gbr.6  | gbr.8  | 9     | gbr.10 | gbr.11 | 12    |
|---------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| einseitige Kontaktierung  | -1,04% | -1,24% | 1,79% | -7,86% | 3,88%  | 3,90% |
| beidseitige Kontaktierung | 0,40%  | 2,46%  | 3,90% | -4,97% | 1,98%  | 2,98% |

*Tabelle 20: Durchschnittliche, gemessene, korrigierte Leistungssteigerung gegenüber der Standardkontaktierung bei 15°C; gbr...Zellbruch; Auswertung der defekten Zelle 7 nicht möglich*

| Zellnummer                | gbr.6  | gbr.8 | 9     | gbr.10  | gbr.11 | 12     |
|---------------------------|--------|-------|-------|---------|--------|--------|
| einseitige Kontaktierung  | -3,69% | 0,47% | 1,64% | -12,69% | 3,25%  | 5,54%  |
| beidseitige Kontaktierung | -1,54% | 0,13% | 3,59% | -4,12%  | 5,68%  | 11,12% |

*Tabelle 21: Durchschnittliche, gemessene, korrigierte Leistungssteigerung gegenüber der Standardkontaktierung bei 35°C; gbr...Zellbruch; Auswertung der defekten Zelle 7 nicht möglich*

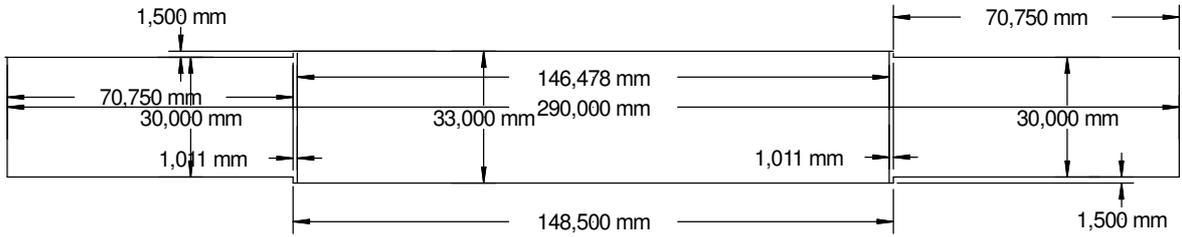


Abbildung 52: Konstruktionsplan der Lötwalze in der Aufsicht

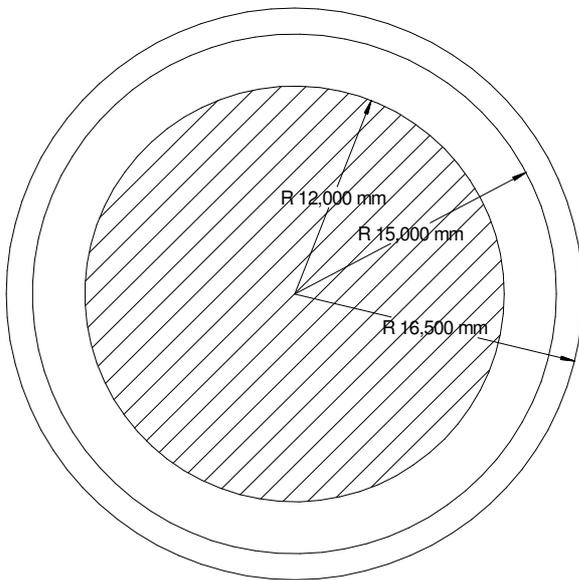


Abbildung 53: Konstruktionsplan der Lötwalze in seitlicher Ansicht

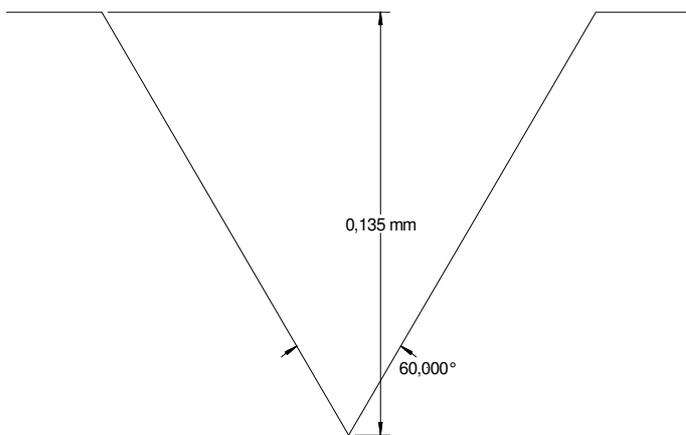


Abbildung 54: Konstruktionsplan der Lötwalze: Querschnitt durch eine Führungsrille

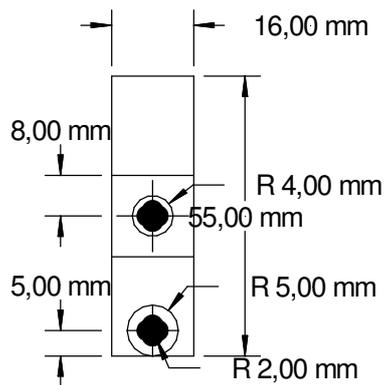
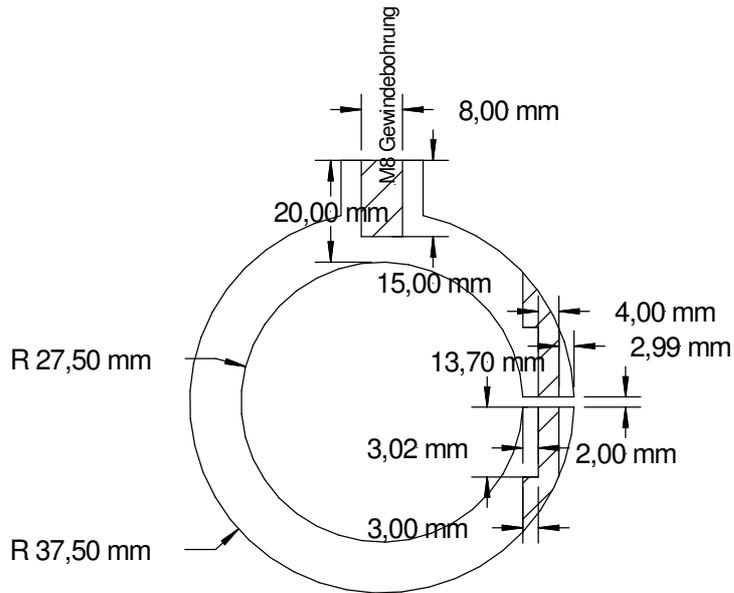


Abbildung 55: Konstruktionsplan der Lagerfixierung der Lötwalze in Seitenansicht (oben); in Aufsicht (unten)

## 14 Literaturverzeichnis

- [1] [http://de.wikipedia.org/wiki/Luftmasse\\_\(Astronomie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Luftmasse_(Astronomie))
- [2] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2000, ISBN 978-3-8274-0598-2, S. 30
- [3] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.17
- [4] J. Summhammer, Vorlesungsskriptum Physik der Solarzelle, Technische Universität Wien, Kapitel 11
- [5] P. A. Tipler, Physik, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997, ISBN 3-86025-122-8, S. 514
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Ausdehnungskoeffizient>
- [7] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.149
- [8] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.151
- [9] A. Kränzl, Dissertation, Industriesolarzellen auf dünnem multikristallinem Silizium: Diffusionsverfahren, neue Materialien und bifaciale Strukturen, Konstanz, 2007, [http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl\\_Diss.pdf](http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl_Diss.pdf), S. 6
- [10] A. Kränzl, Dissertation, Industriesolarzellen auf dünnem multikristallinem Silizium: Diffusionsverfahren, neue Materialien und bifaciale Strukturen, Konstanz, 2007, [http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl\\_Diss.pdf](http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl_Diss.pdf), S. 6
- [11] B. Bitnar, Dissertation, Oberflächenpassivierung von kristallinen Silizium Solarzellen, Konstanz, 1998, S. 19
- [12] C. Zhang , H. Jin, W. E. Jellet ,P. J. Smith and K. J. Weber, HYDROGEN INTRODUCTION BY ACID SOLUTION TO Si/SiO<sub>2</sub> INTERFACE, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Spain, S. 287-289
- [13] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.174
- [14] <http://www.halbleiter.org/metallisierung/me-hl-kontakt/>
- [15] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.165

- [16] P. Würfel, Physik der Solarzellen, Spektrum Akademischer Verlag 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, 2000, ISBN 978-3-8274-0598-2, S. 154
- [17] A. Kränzl, Dissertation, Industriesolarzellen auf dünnem multikristallinem Silizium: Diffusionsverfahren, neue Materialien und bifaciale Strukturen, Konstanz, 2007, [http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl\\_Diss.pdf](http://www.ub.uni-konstanz.de/kops/volltexte/2007/2359/pdf/Kraenzl_Diss.pdf), S. 8
- [18] B. Bitnar, Dissertation, Oberflächenpassivierung von kristallinen Silizium Solarzellen, Konstanz, 1998, S. 7
- [19] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.177
- [20] [http://www.koekraf.com/typo3temp/pics/150W\\_Solar\\_Panel\\_12V\\_System\\_0e007df4df.jpg](http://www.koekraf.com/typo3temp/pics/150W_Solar_Panel_12V_System_0e007df4df.jpg)
- [21] <http://pvcdrom.pveducation.org/MANUFACT/Images/BURIEDN.gif>
- [22] M. McCann, C. Strümpel, H. Knauss, T. Pernau, E. Lemp and P. Fath, ANGLED BURIED CONTACTS: A FRONT CONTACTING SCHEME FOR HIGH EFFICIENCY CELLS WITH LOW SHADING LOSSES, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Proceedings, WIP Munich, S. 737-740
- [23] A. Cole<sup>1</sup>, S. Roberts<sup>1</sup>, K. Heasman<sup>1</sup>, D. Tregurtha<sup>1</sup>, T.M. Bruton<sup>1</sup>, FINE LINE SCREEN PRINTING IN LARGE AREA LASER GROOVED, BURIED CONTACT SILICON SOLAR CELLS, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Proceedings, WIP Munich, S. 1677-1681
- [24] B. Raabe, F. Huster, M. McCann, P. Fath, HIGH ASPECT RATIO SCREEN PRINTED FINGERS, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Proceedings, WIP Munich, S. 930-933
- [25] I.G. Romijn, A.A. Mewe, M.W.P.E. Lamers, E. Kossen, E.E. Bende, A.W. Weeber, AN OVERVIEW OF MWT CELLS AND EVOLUTION TO THE ASPIRE CONCEPT: A NEW INTEGRATED MC-SI CELL AND MODULE DESIGN FOR HIGH-EFFICIENCIES, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Proceedings, WIP Munich, S. 1000-1005
- [26] [http://www.erfurt.de/imperia/md/content/veroeffentlichungen/wirtschaft/erwicon2006/erwicon06\\_f3\\_7.pdf](http://www.erfurt.de/imperia/md/content/veroeffentlichungen/wirtschaft/erwicon2006/erwicon06_f3_7.pdf)
- [27] C. Peters, P. Engelhart, M. Hlusiak, R. Wade, R. Jesswein, D. Rychtarik, J. W. Müller Q-Cells AG, ALBA – DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENCY MULTI-CRYSTALLINE SI EWT SOLAR CELLS FOR INDUSTRIAL FABRICATION AT Q-CELLS, 23rd European

Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Proceedings, WIP Munich, S. 1010-1013

[28] <http://www.solarserver.de/news/news-10739.html>

[29] <http://www.day4energy.com/DE/electrode.htm>

[30] <http://www.solarserver.de/news/news-8268.html>

[31] Summhammer, Vorlesungsskriptum Physik der Solarzelle, Technische Universität Wien, Kapitel 13

[32] William Shockley and Hans J. Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics, Volume 32, 1961, S. 510-519;

[33] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.103ff

[34] ] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.118

[35] <http://wwwnlds.physik.tu-berlin.de/~rack/diplom/node9.html>

[36] <http://de.wikipedia.org/wiki/Austrittsarbeit>

[37] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, ISBN 3-519-13214-1, S.121

[38] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag 2. Auflage, Stuttgart, 1997, ISBN 3-519-13214-1, S.130ff

[39] Summhammer, Vorlesungsskriptum Physik der Solarzelle, Technische Universität Wien, Kapitel 5

[40] <http://www.lti.uni->

[karlsruhe.de/rd\\_download/Solarenergie\\_20081118\\_Optimierung.pdf](http://www.lti.uni-karlsruhe.de/rd_download/Solarenergie_20081118_Optimierung.pdf)

[41] J. Summhammer, M. Stietka, WIRE CELLS: A MORE EFFICIENT SILICON SOLAR CELL AND MODULE; Vienna University Technology, Atominstitut, Solar Cells Group Vienna, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 September 2008, Valencia, Proceedings, WIP Munich, S. 530-533

[42] Technical Data Sheet Stannol Sn60Pb40

[43] M. Bähr, S. Kim<sup>1</sup>, S. Sridharan<sup>1</sup>, C. Khadilkar<sup>1</sup>, A. Shaikh<sup>1</sup>, I.Köhler<sup>2</sup>, M. Reichardt, M. Kumar, A NEW APPROACH FOR THE FRONT SIDE METALLIZATION OF INDUSTRIAL TYPE SILICON SOLAR CELLS USING A STRUCTURIZATION BY ETCHING  $\text{SiS}$  Institut für Mikrosensorik, SolarZentrum Erfurt, [http://www.ferro.com/non-cms/ems/solar/technical/2DO\\_2\\_2.pdf](http://www.ferro.com/non-cms/ems/solar/technical/2DO_2_2.pdf), S. 1-2

[44] Q-cells, Specifications subject for technical changes for Q6L, January 2006,  
[http://www.qcells.de/de/solarzellen/service\\_information/download/index.html](http://www.qcells.de/de/solarzellen/service_information/download/index.html)

[45] [http://www.mbr-gmbh.com/Ultraschall\\_Loeten.html](http://www.mbr-gmbh.com/Ultraschall_Loeten.html)

[46] CERTIFICATE OF TEST: CONDUCTOR MATERIAL FOR CN53-101, FERRO  
ELECTRONIC MATERIAL SYSTEMS

[47] A. Götzberger, B. Voß, J. Knobloch, Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Verlag  
2. Auflage, Stuttgart, ISBN 3-519-13214-1, 1997, S.83