

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Metallisierungsverfahren im Vergleich | 6 |
| 2.1 | Hochvakuumbedampfung mit Schablonen | 6 |
| 2.2 | Photolithographie | 7 |
| 2.2.1 | Photolithographie mit Lift-off Verfahren | 7 |
| 2.2.2 | Fodel®-Verfahren | 8 |
| 2.2.3 | Dickfilm Lift-off Verfahren..... | 10 |
| 2.2.4 | Dickfilm Photoätzverfahren | 11 |
| 2.2.5 | Mid-Film® Verfahren..... | 11 |
| 2.2.6 | Zusammenfassung photolithographischer Verfahren | 12 |
| 2.3 | Laserinduzierte Metallisierung | 12 |
| 2.3.1 | Laserbelichtung von Dickfilmpasten | 13 |
| 2.3.2 | Laserinduzierte Metallisierung mit Schattenmaske | 13 |
| 2.3.3 | Gasphasen Laser-CVD (Photo-Assisted Direct Writing) | 14 |
| 2.3.4 | Zusammenfassung laserinduzierter Metallisierungsverfahren | 15 |
| 2.4 | Kontaktierung von Solarzellen mit Metalldrähten..... | 15 |
| 2.4.1 | Thermosonicschweißen | 16 |
| 2.4.2 | Solarzellenkontaktierung mit Metalldrahtgeweben | 18 |
| 2.5 | Grabenkontaktierungen von Solarzellen | 19 |
| 2.5.1 | Laser Grooved Buried Contact Solarzelle | 19 |
| 2.5.2 | Embedded Paste Grid Solarzellen (EPG)..... | 20 |
| 3 | Druckverfahren im Vergleich | 22 |
| 3.1 | Drucken..... | 22 |
| 3.2 | Druckvorstufe | 23 |
| 3.3 | Druckverfahren..... | 24 |
| 3.4 | Hochdruck..... | 26 |
| 3.4.1 | Buchdruck - Microcontact Printing μ CP | 27 |
| 3.4.2 | Heißprägefoliendruck | 29 |
| 3.4.3 | Flexodruck..... | 29 |
| 3.5 | Tiefdruck..... | 30 |
| 3.5.1 | Direkter Tiefdruck..... | 31 |
| 3.5.2 | Indirekter Tiefdruck | 31 |
| 3.6 | Flachdruck..... | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.6.1 | Direkter Flachdruck | 32 |
| 3.6.2 | Indirekter Flachdruck..... | 32 |
| 3.6.2.1 | Offsetdruck | 32 |
| 3.6.2.2 | Driographie – wasserloser Offset | 33 |
| 3.7 | Durchdruck..... | 34 |
| 3.8 | Sofortdruck..... | 34 |
| 3.8.1 | Dispensing - Direct Writing..... | 34 |
| 3.8.2 | Tintenstrahldruck (Inkjet)..... | 37 |
| 3.8.2.1 | Continuous-Ink-Jet (CIJ)..... | 37 |
| 3.8.2.2 | Drop-On-Demand Inkjet (DOD) | 38 |
| 3.8.3 | Schoopen | 40 |
| 4 | Durchdruck..... | 41 |
| 4.1 | Entstehungsgeschichte des Siebdruckes und der gedruckten Schaltungen | 41 |
| 4.2 | Druckvorstufe im Siebdruck..... | 42 |
| 4.2.1 | Druckformvorbereitung - Kopiervorlagenerstellung | 43 |
| 4.2.1.1 | Kopiervorlagenerstellung mittels RIP | 43 |
| 4.2.1.2 | Kopiervorlagenerstellung mittels Gerber-Sprache | 43 |
| 4.2.2 | Siebdruckform | 44 |
| 4.2.2.1 | Siebdruckrahmen | 44 |
| 4.2.2.2 | Schablonenträger | 45 |
| 4.2.2.3 | Spannung und Winkelung..... | 50 |
| 4.2.2.4 | Schablone..... | 53 |
| 4.2.2.5 | Siebdruckform | 54 |
| 4.3 | Flachbettsiebdruckmaschinen | 60 |
| 4.4 | Druckvorgang | 62 |
| 4.4.1 | Druckparameter und Einrichtung | 62 |
| 4.4.1.1 | Siebdruckformdistanz..... | 63 |
| 4.4.1.2 | Druck rakelgeschwindigkeit | 64 |
| 4.4.1.3 | Druck rakeldruck | 64 |
| 4.4.1.4 | Druck rakelwinkel und Druck rakel diagonalwinkel | 64 |
| 4.4.2 | Die Rakel | 64 |
| 4.4.2.1 | Die Vorrakel | 64 |
| 4.4.2.2 | Die Druck rakel..... | 65 |
| 4.5 | Schablonendruck (Stencil Printing) | 66 |
| 4.6 | Siebdruck von Solarzellen und Teststrukturen..... | 67 |
| 4.7 | Innovative Siebdrucktechnologien für den Solarzellendruck..... | 67 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.7.1 | Rotationssiebdruck | 67 |
| 4.7.2 | Hermetische Druckkopfsysteme | 69 |
| 4.7.2.1 | Hermetic Printhead..... | 70 |
| 4.7.2.2 | Rheometric Pump Print Head | 71 |
| 4.7.2.3 | ProFlow DirEKt Imaging™ | 71 |
| 4.7.2.4 | CROSSFLOW™ | 71 |
| 5 | Gravur Offset – Tampondruck | 73 |
| 5.1 | Geschichte des Tampondruckes..... | 74 |
| 5.2 | Prinzip des Transfer- und Rotationstampondrucks..... | 74 |
| 5.3 | Einsatzgebiete des Tampondruckes als Körperdruck..... | 76 |
| 5.4 | Druckmaschinen..... | 76 |
| 5.4.1 | Antriebskonzept | 77 |
| 5.4.1.1 | Pneumatisch – Hydraulisch | 77 |
| 5.4.1.2 | Elektromechanisch | 78 |
| 5.4.1.3 | Linearantriebe..... | 78 |
| 5.4.2 | Tamponbewegung | 78 |
| 5.4.3 | Offene und geschlossene Rakelsysteme | 79 |
| 5.4.3.1 | Offenes Rakelsystem..... | 79 |
| 5.4.3.2 | Geschlossenes Rakelsystem..... | 80 |
| 5.4.4 | Labortampondruckmaschine TC 175 E | 80 |
| 5.4.5 | Rakel..... | 82 |
| 5.4.6 | Tampon..... | 83 |
| 5.4.6.1 | Materialzusammensetzung..... | 84 |
| 5.4.6.2 | Herstellung | 85 |
| 5.4.6.3 | Form..... | 85 |
| 5.4.6.4 | Größe.. | 86 |
| 5.4.6.5 | Härte..... | 86 |
| 5.4.6.6 | Oberfläche..... | 87 |
| 5.4.6.7 | Pflege und Lagerung | 91 |
| 5.4.6.8 | Tamponempfehlungen für den Druck von Solarzellen | 91 |
| 5.5 | Druckvorlagen | 92 |
| 5.6 | Raster..... | 92 |
| 5.6.1 | Flächendeckung (Rastertonwert)..... | 93 |
| 5.6.2 | Rasterweite | 93 |
| 5.7 | Kopiervorlage | 94 |
| 5.8 | Klischee..... | 94 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.8.1 | Klischeearten..... | 95 |
| 5.8.1.1 | Photopolymerklischee | 95 |
| 5.8.1.2 | Stahlklischee..... | 96 |
| 5.8.1.3 | Bandstahlklischee..... | 96 |
| 5.8.1.4 | Sonderklischeematerialien..... | 97 |
| 5.8.2 | Belichtung und Entwicklung von Photopolymerklischees | 97 |
| 5.8.2.1 | Belichter | 97 |
| 5.8.2.2 | Auswascher | 98 |
| 5.8.2.3 | Photopolymerklischeeherstellung | 99 |
| 5.8.2.4 | Belichtungstests von alkoholauswaschbaren Photopolymerklischees..... | 101 |
| 5.8.3 | Laserklischee | 103 |
| 5.9 | Pasten..... | 104 |
| 5.10 | Laborbedingungen..... | 104 |
| 5.11 | Druckversuche..... | 104 |
| 5.12 | Rotationstampondruck..... | 108 |
| 6 | Druckpasten und -tinten | 110 |
| 6.1 | Metallisierungspasten..... | 110 |
| 6.1.1 | Lösemittelhaltige Metallisierungspasten | 112 |
| 6.1.1.1 | Metallpulver | 112 |
| 6.1.1.2 | Glasfritte | 114 |
| 6.1.1.3 | Bindemittel..... | 115 |
| 6.1.1.4 | Lösemittel bzw. Verdünnungsmittel | 116 |
| 6.1.1.5 | Hilfsmittel/Additive | 117 |
| 6.1.1.6 | Herstellung von lösemittelhaltigen Metallisierungspasten..... | 118 |
| 6.1.1.7 | Massen- und Volumenprozentage von Metallisierungspasten und Farben | 119 |
| 6.1.2 | Semithermoplastische Metallisierungspasten | 120 |
| 6.1.3 | UV-härtende Metallisierungspasten | 121 |
| 6.2 | Pastenuntersuchungen..... | 121 |
| 6.2.1 | REM und EDX | 122 |
| 6.2.2 | GDMS..... | 124 |
| 6.2.3 | Kornfeinheit | 125 |
| 6.2.4 | Zügigkeit..... | 126 |
| 6.2.5 | Pastenrheologie | 128 |
| 6.2.5.1 | Definitionen und Grundlagen der Rheologie | 130 |
| 6.2.5.2 | Geschwindigkeitsgefälle beim Siebdruckprozess | 133 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2.5.3 | Simulation des Transfertampondruckprozesses mit einem Oszillationsrheometer..... | 135 |
| 6.2.5.4 | Auswertung der Simulation des Transfertampondruckprozesses..... | 140 |
| 6.2.6 | Bestimmung der Trockenzeit | 142 |
| 6.2.7 | Profilometrische Messungen..... | 143 |
| 6.2.8 | Thermische Analyse (TA) der Pasten | 143 |
| 6.2.8.1 | Thermogravimetrie | 144 |
| 6.2.8.2 | Wärmestrom-Kalorimetrie (DSC)..... | 144 |
| 6.2.9 | Haftfestigkeit der Paste auf dem Bedruckstoff vor und nach dem Sintern | 146 |
| 7 | Druckweiterverarbeitung | 147 |
| 7.1 | Trocknen..... | 147 |
| 7.1.1 | Konvektionstrocknungsöfen | 148 |
| 7.1.2 | IR-Trocknungsöfen | 148 |
| 7.1.3 | Hot-Plate-Trocknungsöfen..... | 148 |
| 7.1.4 | IR-Zwangskonvektionstrocknungsöfen..... | 149 |
| 7.1.5 | UV-Trocknung (-Härtung) | 149 |
| 7.1.6 | Innovative VSIR-Trocknung für schnelle Rotationsdruckverfahren..... | 150 |
| 7.2 | Sintern – Einlegieren | 152 |
| 7.2.1 | Widerstandsbeheizter Quarzrohrföfen | 152 |
| 7.2.2 | Durchlauföfen..... | 153 |
| 7.2.3 | Rapid Thermal Processing..... | 154 |
| 7.2.3.1 | RTP-Anlage | 155 |
| 7.2.3.2 | RTP-Prozessschema | 156 |
| 7.2.3.3 | Temperaturhomogenität | 157 |
| 7.2.3.4 | Photophysikalische Prozesse beim Sintern | 158 |
| 8 | Solarzellen und elektrische Charakterisierung | 160 |
| 8.1 | Verlustmechanismen bei Solarzellen | 160 |
| 8.1.1 | Optische Verluste..... | 160 |
| 8.1.2 | Ohmsche Verluste..... | 161 |
| 8.1.2.1 | Schottky-Kontakt | 162 |
| 8.1.2.2 | Ohmscher Metall-Halbleiter-Kontakt | 163 |
| 8.1.2.3 | Spezifischer Kontaktwiderstand von gesinterten Metallisierungspasten | 163 |
| 8.1.2.4 | Spezifischer Widerstand von gesinterten Metallisierungspasten | 165 |
| 8.2 | Ergebnisse der Pasten- und Sinteruntersuchungen | 167 |
| 8.2.1 | Spezifischer Widerstand der Vorderseitenmetallisierung | 167 |
| 8.2.2 | Spezifischer Kontaktwiderstand der Vorderseitenmetallisierung..... | 169 |

| | | |
|-------|--|------------------|
| 8.2.3 | Sinteruntersuchungen an Solarzellen | 171 |
| 8.3 | Solarzellenergebnisse | 173 |
| 9 | Zusammenfassung | 175 |
| A | Herleitung Geschwindigkeitsgefälle für eine runde Siebmasche..... | 178 |
| A.1 | Reibungskräfte | 178 |
| A.2 | Druckkräfte..... | 179 |
| A.3 | Volumenstrom in Kapillare..... | 179 |
| A.4 | Geschwindigkeitsgefälle für eine runde Siebmasche..... | 180 |
| A.5 | Korrektur des Rohrgeschwindigkeit bei viskoelastischen Substanzen | 180 |
| B | Konfokales Laser-Scanningmikroskop | 182 |
| C | Statistische Versuchsplanung (SVP)..... | 183 |
| D | Literaturverzeichnis..... | 184 – 197 |
| | Verzeichnis der Symbole..... | 198 |
| | Verzeichnis der Abkürzungen..... | 200 |
| | Inserentenverzeichnis | 202 |
| | Inserenten | 202 – 214 |