

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	vi
Formelzeichen	ix
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Anforderungen an einen Lösungsansatz	3
1.4 Vorgehensweise	4
2 Ausgangssituation	7
2.1 Begriffe und Definitionen	7
2.1.1 Photovoltaikwafer	7
2.1.2 Erläuterung der Prozesskette der Wafergewinnung	8
2.2 Zustand der Wafer nach dem Sägen und der manuellen Vereinzelung	12
2.3 Stand der Technik bei der Handhabung von Flachteilen	13
2.4 Stand der Technik der automatischen Vereinzelung	15
2.4.1 Patentsituation	15
2.4.2 Weitere Literatur	25
2.4.3 Zusammenfassung und Folgerung aus dem Stand der Technik	26
3 Analyse der Randbedingungen und Ableitung von Anforderungen an das Verfahren	29
3.1 Zuführung der Wafer zum Vereinzelungsgmechanismus	29
3.2 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haltekräfte der Klebenahrt	31

3.3 Analyse der Haltekräfte	33
3.3.1 Interpretation der Ergebnisse der Ziehversuche	36
3.3.2 Schlußfolgerung	37
3.4 Haftung der Wafer im Stapel	38
3.5 Mechanische Stabilität der Wafer	40
3.5.1 Kritik zur Literatur der Bruchmechanik von Siliziumwafern	42
3.6 Vereinzelungsmechanismus	42
3.6.1 Rückstände des Klebers	43
3.7 Abtransport der Wafer	44
3.8 Anforderungen	45
3.9 Schlussfolgerungen aus der Analyse	48
4 Konzeption und Modellierung eines Vereinzelungsverfahrens mittels Flüssigkeitsstrahlen	49
4.1 Vereinzelung der Wafer mit Flachstrahldüsen	49
4.2 Gegenkraft mit Hohlkegeldüse	55
4.3 Erweiterung mit seitlichen Separationsdüsen	56
4.4 Analyse des Modells im statischen Zustand	57
4.4.1 Ermittlung der Waferlage im Raum	57
4.4.2 Sensoren zur Abstandsmessung im Versuchsstand	58
4.4.3 Aufbau des Versuchsstandes für die Erzeugung der Flüssigkeitsstrahlen	61
4.5 Kräfte der Flüssigkeitsstrahlen	62
4.5.1 Statischer Druck und dessen Änderung im Rohrleitungssystem	63
4.5.2 Potentieller Druck	66
4.5.3 Dynamischer Druck	67
4.5.4 Gesamtdruck	67
4.6 Kraftmodell bei der Vereinzelung der Wafer	68
4.6.1 Berechnung der Impulskraft der oberen Hohlkegeldüse	68
4.6.2 Berechnung der Impulskraft der hinteren Flachstrahldüsen	69
4.6.3 Berechnung der Gewichtskraft des Wassers auf der Waferoberfläche	71
5 Experimentelle Analyse des Modells	73
5.1 Beschreibung des Versuchsstandes	74

5.2	Berechnung und Messung der Kräfte	75
5.2.1	Kraft der oberen Hohlkegeldüse	78
5.2.2	Kraft der hinteren Flachstrahldüsen	79
5.2.3	Messung der Fluktuationen	80
5.3	Planung der Experimente	80
5.4	Einfluss der oberen Hohlkegeldüse	82
5.4.1	Einfluss der Düsenposition	84
5.5	Einfluss der hinteren Flachstrahldüsen	86
5.5.1	Winkel $\alpha^h > 0$	86
5.5.2	Winkel $\alpha^h = 0$	88
5.5.3	Winkel $\alpha^h < 0$	90
5.5.4	Zusammenfassung der Untersuchung zum Winkel α^h	92
5.5.5	Einsatz der Kassette	93
5.6	Einsatz der seitlichen Düsenstrahlen	94
5.6.1	Detailbetrachtung der Fluktuation der Waferhöhe	95
5.7	Zusammenfassung	95
6	Realisierung und praktische Erprobung	103
6.1	Beschreibung des Prototypen	104
6.2	Steuerung und Betrieb der Anlage	106
6.3	Überprüfung des Schädigungspotentials des Verfahrens	107
6.4	Überprüfung des Vereinzelungsergebnisses	109
6.5	Abgleich der erzielten Ergebnisse anhand der Anforderungen	113
7	Zusammenfassung und Ausblick	115
8	Abstract	117
Literaturverzeichnis		123