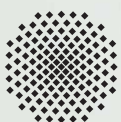
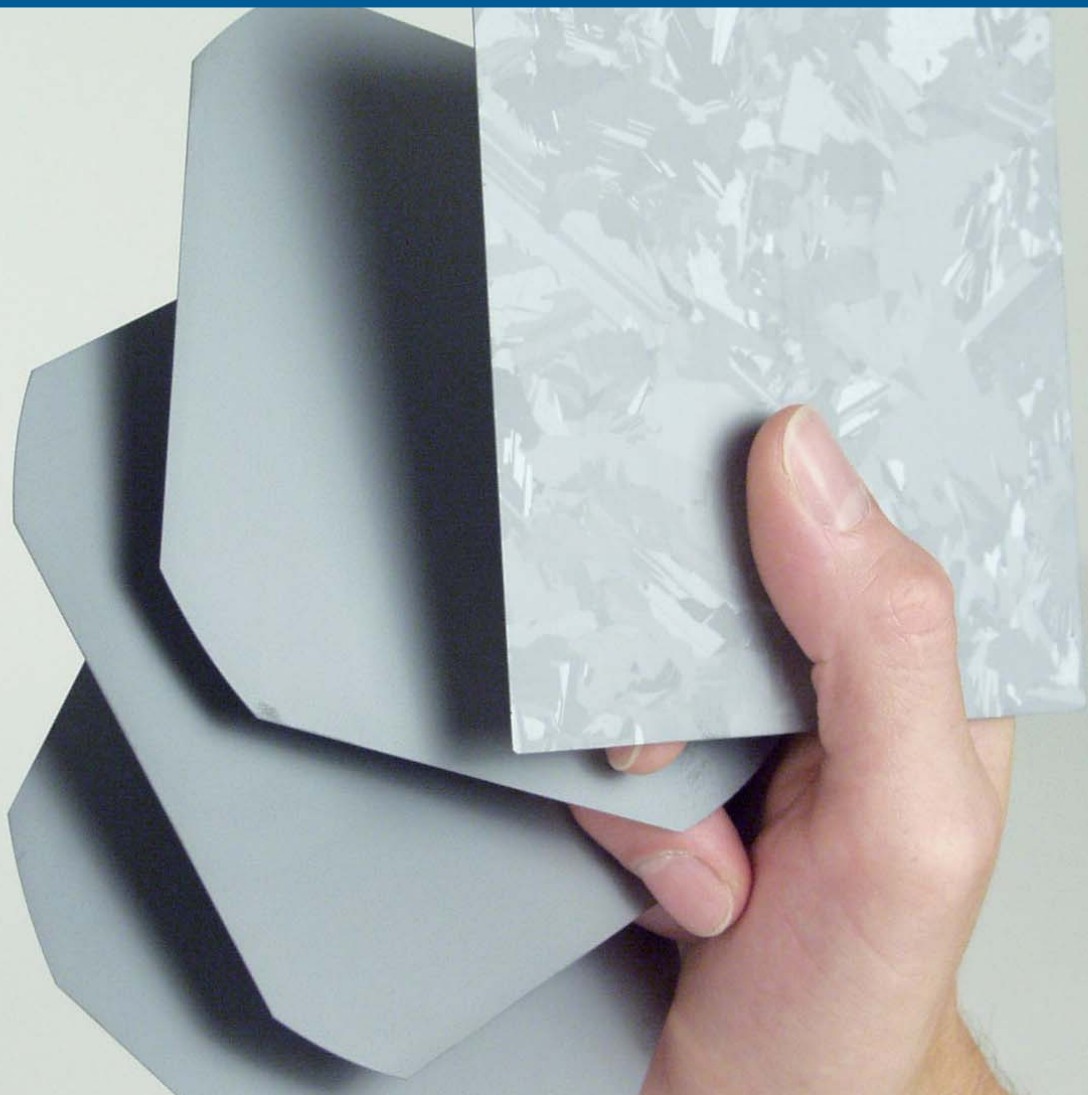


STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

KEVIN REDDIG

---

# Verfahren zum flüssigkeitsbasierten Vereinzeln kontaminierter Photovoltaikwafer



Universität Stuttgart

 **Fraunhofer**  
IPA

**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl

Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Kevin Reddig

**Verfahren zum flüssigkeitsbasierten Vereinzeln  
kontaminierter Photovoltaikwafer**

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399  
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

**STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG****Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl  
Prof. Dr.-Ing. Prof. Dr. h. c. mult. Alexander Verl  
Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr.-Ing. e. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart  
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)  
der Universität Stuttgart

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN: 978-3-8396-0441-0

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2012

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 800469, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Telefax 0711 970-2508  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

## GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper



# **Verfahren zum flüssigkeitsbasierten Vereinzeln kontaminierter Photovoltaikwafer**

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur  
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
Dipl.-Wi.-Ing. Kevin Reddig  
aus Essen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Lothar Frey

Tag der mündlichen Prüfung: 16.07.2012

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen  
der Universität Stuttgart

2012



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gruppenleiter für Automatisierung und Logistik in der Abteilung Reinst- und Mikroproduktion am Fraunhofer IPA in Stuttgart. Sie ist das Ergebnis äußerst lehrreicher Tätigkeiten, welche ich in einigen Projekten zur Vereinzelung von Photovoltaikwafern durchführen konnte. All den Partnern und Mitwirkenden in diesen Projekten gilt daher mein besonderer Dank, da sie mir viele Einblicke und Erkenntnisse in die bearbeitete Materie verschafft haben. Mein Dank gilt in besonderer Weise auch den Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IPA, an welchem Exzellenz in der Forschung mit einer hohen Bereitschaft für innovative Verfahren einhergeht. In besonderer Weise danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptberichts. Mein Dank gilt ebenfalls Prof. Dr. rer. nat. Lothar Frey für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Zahlreiche Hilfen und die Organisation des Promotionsprozesses verdanke ich Frau Heide Kreuzburg.

Ich danke in hervorgehobener Weise den Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Reinst- und Mikroproduktion, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Insbesondere möchte ich dabei Herrn Michael Hoffmeister, Herrn Karsten Fickert, Herrn Roland Wertz, Herrn Christian Fischmann, Herrn Marcus Michen und Herrn Fabian Böttinger erwähnen. Den Kolleginnen und Kollegen der mechanischen und elektrischen Werkstätten des IPA ermöglichten durch ihr Wirken und Ihre Geduld bei der Umsetzung meiner Ideen das Gelingen dieser Arbeit. Meiner Mutter Frau Barbara Reddig danke ich für die bewährte und sehr fachkundige Korrektur der Arbeit. Für ein immerfort offenes Ohr als auch offenes Wort danke ich meinem Abteilungsleiter Herrn Dr. Udo Gommel. Zahlreiche Studierende haben mich im Laufe meiner Tätigkeit intensiv unterstützt. Ihnen gebührt meine ganze Anerkennung und ich wünsche Ihnen alles Gute und viel Erfolg auf Ihrem weiteren Lebensweg. Nicht zuletzt haben Freunde und Familie mich fortwährend gefördert und begleitet. Ihnen gilt meine Zuneigung jetzt und in Zukunft.

Stuttgart, im Juni 2011

Kevin Reddig





# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abkürzungen</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>Formelzeichen</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 Problemstellung . . . . .   | 1           |
| 1.2 Zielsetzung . . . . .   | 3           |
| 1.3 Anforderungen an einen Lösungsansatz . . . . .                                    | 3           |
| 1.4 Vorgehensweise . . . . .  | 4           |
| <b>2 Ausgangssituation</b>  | <b>7</b>    |
| 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          |
| <b>3 Analyse der Randbedingungen und Ableitung von Anforderungen an das Verfahren</b> | <b>29</b>   |
| 3.1 Zuführung der Wafer zum Vereinzelungsmechanismus . . . . .                        | 29          |
| 3.2 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haltekräfte der Klebenahnt . . . . .            | 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        |
| <b>4</b> | <b>Konzeption und Modellierung eines Vereinzelungsverfahrens mittels Flüssigkeitsstrahlen</b> | <b>49</b> |
| 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        |
| <b>5</b> | <b>Experimentelle Analyse des Modells</b>   | <b>73</b> |
| 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 $\alpha^h$ . . . . .     | 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         |
| <b>6</b> | <b>Realisierung und praktische Erprobung</b>                         | <b>103</b> |
| 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        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                  | <b>115</b> |
| <b>8</b> | <b>Abstract</b>  | <b>117</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>123</b> |



## Abkürzungen

|           |   |
|-----------|---|
| DI-Wasser | Deionisiertes Wasser                                |
| DPM       | Dipropylenglykolmonomethylether                     |
| EFG       | Edge-defined Film-fed Growth                        |
| OG        | Orientierungsgrad                                   |
| OZ        | Ordnungszustand                                     |
| PEG       | Polyethylen Glykol                                  |
| PG        | Positionierungsgrad                                 |
| PTFE      | Polytetrafluorethylen                               |
| PVC       | Polyvinylchlorid                                    |
| SEMI      | Semiconductor Equipment and Materials International |
| Si        | Silizium  |
| SiC       | Siliziumkarbid                                      |
| SPS       | Speicherprogrammierbare Steuerung                   |
| TA        | Aushärtezeit des Klebers                            |
| TE        | Einlagerungszeit im DPM-Bad                         |
| TTV       | Total Thickness Variation                           |
| VDI       | Verein Deutscher Ingenieure                         |

## Formelzeichen

|                   |  |
|-------------------|--|
| $\alpha^h$        | Winkel des angreifenden Flüssigkeitsstrahls der hinteren Düsen |
| $\alpha^o$        | Winkel des angreifenden Flüssigkeitsstrahls der oberen Düse    |
| $\beta_x$         | Rotation des Wafers um die x-Achse (Rollen)                    |
| $\beta_y$         | Rotation des Wafers um die y-Achse (Nicken)                    |
| $\Delta F_y^s$    | Resultierende Kraft parallel zur Barriere mit                  |
| $\delta p_{st}^r$ | Druckverlust in Rohren bei turbulenter Strömung                |
| $\dot{m}^{o'}$    | Massenstrom vor Austritt aus der Düse                          |
| $\dot{m}^o$       | Massenstrom  |
| $\dot{V}$         | gemessener Volumenstrom  |
| $\eta$            | Viskosität   |
| $\lambda$         | Dimensionslose Rohrreibungszahl                                |
| $\mu$             | Dimensionsloser Kontraktionskoeffizient                        |
| $\rho$            | Dichte   |
| $\zeta$           | Dimensionsloser Widerstandsbeiwert                             |
| $A$               | Querschnittsfläche des Rohrs                                   |
| $D$               | Leitungsquerschnitt  |
| $d$               | Rohrdurchmesser  |
| $d_x^h$           | Abstand der Düsen zum Waferstapel                              |
| $d_z^h$           | Höhe der Düsen in Bezug zum Waferstapel                        |
| $d_x^o$           | Angriffspunkt der oberen Düse relativ zum Waferstapel          |
| $d_z^o$           | Höhe der oberen Düse in Bezug zum Waferstapel                  |
| $d_1$             | Abstände zwischen den Wafern nach der Vereinzelung             |
| $d_2$             | Dicke der Wafer  |
| $d_w$             | Kantenlänge der Wafer  |
| $f$               | Frequenz der Vereinzelung                                      |
| $F_z^\uparrow$    | Kraft in vertikaler Richtung                                   |
| $F_z^l$           | Impulskraft der Luftströmung aus den Acrylglasrohren           |

|             |  |
|-------------|--|
| $F_z^w$     | Gewichtskraft des auf der Oberfläche des Wafers befindlichen Wassers |
| $F_x^h$     | Kraft in Richtung der Barriere                                       |
| $F_{xz}^h$  | Resultierender Kraftvektor   |
| $F_z^l$     | Kraft des Luftstroms auf den Wafer                                   |
| $F_x^o$     | Kraft in Richtung der Barriere                                       |
| $F_{xz}^o$  | Resultierender Kraftvektor   |
| $F_z^o$     | Kraft in vertikaler Richtung (resultierend aus oberer Düse)          |
| $F_z^s$     | Kraft in vertikaler Richtung (resultierend aus seitlichen Düsen)     |
| $F_z^v$     | Volumenkraft in z-Richtung   |
| $F_z^x$     | Impulskraft in z-Richtung  |
| $g$         | Erdschwerebeschleunigung   |
| $h$         | Höhendifferenz   |
| $l$         | Rohrlänge  |
| $N$         | Kraft in Newton  |
| $p_{st}^t$  | Druck des Wassers vor der Transportdüse                              |
| $p_{dyn}$   | Dynamischer Druck  |
| $p_{ges}$   | Gesamtdruck  |
| $p_{st}^h$  | Druck vor der hinteren Düsenleiste                                   |
| $p_{st}^o$  | Druck vor der oberen Düse  |
| $p_{pot}$   | Potentieller Druck   |
| $p_{st}^s$  | Druck vor den seitlichen Düsen                                       |
| $p_{st}$    | Statischer Druck   |
| $Re$        | Dimensionslose Maßzahl zur Beurteilung der Strömungsform             |
| $Re_{krit}$ | Kritische Reynoldszahl   |
| $v$         | Strömungsgeschwindigkeit   |
| $V_a$       | Volumen der abfließenden Flüssigkeit an der Wafervorderseite         |
| $V_b$       | Volumen der abfließenden Flüssigkeit an den Wafenseiten              |



|           |  |
|-----------|--|
| $V_c$     | Volumen der abfließenden Flüssigkeit an der Waferrückseite |
| $V_{ges}$ | Durch die Strahlen eingebrachte Flüssigkeit                |
| $V_{ref}$ | Reflektiertes Volumen an den hinteren Waferkanten          |
| $V_w$     | Volumen der Flüssigkeit unterhalb des Wafers               |
| $v_2$     | Abführgeschwindigkeit der Wafer nach der Vereinzelung      |

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Gesägte Wafer und Endstücke eines monokristallinen Siliziumstabes . . . . .        | 1  |
| 2.1  | Mono- und multikristalline Wafer . . . . .   | 8  |
| 2.2  | Ingot auf Werkstückträger vor dem Sägeprozess . . . . .                            | 9  |
| 2.3  | Schematische Darstellung der Multidrahtsäge . . . . .                              | 10 |
| 2.4  | Gesägter Ingot im Drahtfeld und die anschließende Paketbildung der Wafer . . . . . | 11 |
| 2.5  | Überblick über die Prozesskette der Waferherstellung . . . . .                     | 12 |
| 2.6  | Manuelle Loslösung und Einhordung der Wafer in Reinigungskassetten . . . . .       | 13 |
| 2.7  | Prinzip der rollenbasierten Vereinzelung . . . . .                                 | 16 |
| 2.8  | Patent EP 0762483 . . . . .  | 19 |
| 2.9  | Patent WO 01/28745 . . . . .   | 21 |
| 2.10 | Patent DE 19900671 C2 . . . . .  | 22 |
| 2.11 | Patent DE 19904834 und Patent DE 102005016519 . . . . .                            | 22 |
| 2.12 | Patent DE 102006011870 und Patent EP 1935599 . . . . .                             | 24 |
| 3.1  | Funktionsbild zur Vereinzelung . . . . .   | 30 |
| 3.2  | Transportbecken zur Zwischenlagerung von gesägten Ingots . . . . .                 | 31 |
| 3.3  | Details und Einsatz des Versuchsstandes . . . . .                                  | 33 |
| 3.4  | Abstände zwischen Wafern im Mikrobereich . . . . .                                 | 39 |
| 3.5  | Four-bar-bending Test . . . . .  | 42 |
| 3.6  | Kleberreste am gesägten Ingot . . . . .  | 43 |
| 3.7  | Carrier und Förderbänder zum Abtransport der Wafer zur Reinigung . . . . .         | 44 |
| 4.1  | Vereinzelungsprinzip mit Flüssigkeitsstrahlen . . . . .                            | 50 |
| 4.2  | Koordinatensystem des Modells . . . . .  | 50 |
| 4.3  | Seitenansicht des Vereinzelungsprinzips mit hinteren Düsen . . . . .               | 51 |
| 4.4  | Aufsicht des Vereinzelungsprinzips mit hinteren Düsen . . . . .                    | 52 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.5  | Seitenansicht des Vereinzelungsprinzips mit oberer Düse . . . . .  | 56  |
| 4.6  | Winkel für die Bestimmung der Lage des vereinzelteten Wafers . . . . .                                     | 58  |
| 4.7  | Querschnitt des Sensors mit Plexiglasrohr . . . . .  | 60  |
| 4.8  | Schema der Druckluftaufteilung auf die Sensoren . . . . .  | 61  |
| 4.9  | Prinzipskizze des Versuchsstandes . . . . .  | 62  |
| 4.10 | Vertikalkräfte der hinteren Flachstrahldüsen . . . . .   | 70  |
|      |  |     |
| 5.1  | Ansichten des Versuchsstands . . . . .   | 74  |
| 5.2  | Anordnung der Sensormesspunkte in Bezug zur Waferoberfläche . . . . .                                      | 75  |
| 5.3  | Mit Druckluft beaufschlagtes Acrylglasrohr . . . . .   | 76  |
| 5.4  | Benutzeroberfläche für den Betrieb des Versuchsstandes . . . . .   | 77  |
| 5.5  | Kassette zur Verwendung im Versuchsstand . . . . .   | 78  |
| 5.6  | Vorrichtung zur Messung der Kräfte der Wasserdüsen . . . . .   | 79  |
| 5.7  | Vergleich der gemessenen und berechneten Kräfte . . . . .  | 80  |
| 5.8  | Gemessene Kräfte einer Flachstrahldüse . . . . .   | 81  |
| 5.9  | Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck an der oberen Düse . . . . .                                       | 83  |
| 5.10 | Mittelwerte und Standardabweichung der Waferhöhe . . . . .   | 84  |
| 5.11 | Abstände bei Verschiebung der oberen Düsenposition . . . . .   | 85  |
| 5.12 | Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen . . . . .                            | 87  |
| 5.13 | Mittlere relative Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen                    | 88  |
| 5.14 | Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen . . . . .                            | 89  |
| 5.15 | Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen . . . . .                            | 91  |
| 5.16 | Mittelwerte der relativen Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen . . . . .  | 92  |
| 5.17 | Wafer mit Anströmung . . . . .   | 93  |
| 5.18 | Mittlere relative Waferhöhe unter Einsatz der Kassette . . . . .   | 97  |
| 5.19 | Standardabweichung der relativen Waferhöhe unter Einsatz der Kassette . . . . .                            | 98  |
| 5.20 | Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der seitlichen Flachstrahldüsen bei Einsatz der Kassette . . . . . | 99  |
| 5.21 | Rollwinkel bei Einsatz der seitlichen Flachstrahldüsen bei Einsatz der Kassette . . . . .                  | 100 |
| 5.22 | Relative Waferhöhe . . . . .   | 101 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 6.1 | Prototyp für die Demonstration . . . . .                                    | 103 |
| 6.2 | Prinzipzeichnung mit den wichtigsten Komponenten des Prototyps . . . . .    | 104 |
| 6.3 | Übersicht über den Programm Ablauf Plan (PAP) . . . . .                     | 107 |
| 6.4 | Ansicht der Düsenleiste mit aufgesetzter zusätzlicher Düse . . . . .        | 108 |
| 6.5 | Prüfgerät zur Mikrorissprüfung mit geöffnetem Durchleuchtungsraum . . . . . | 109 |
| 6.6 | Beispiel eines Wafers mit einem detektierten Mikroriss . . . . .            | 110 |
| 6.7 | Wafer mit uneindeutigem Befund hinsichtlich Mikrorissen . . . . .           | 111 |
| 6.8 | Doppelte Wafer in versetzter Überlagerung . . . . .                         | 112 |



## Tabellenverzeichnis

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Vergleich typischer Materialeigenschaften verschiedener Flachteile . . . . .          | 14  |
| 2.2 | Patentsituation bei der Wafervereinzelung und ähnlicher Substrate . . . . .           | 16  |
| 2.3 | Übersicht und Strukturierung der Vereinzelungsalternativen . . . . .                  | 28  |
| 3.1 | Experimenteplan der Ziehversuche . . . . .  | 34  |
| 3.2 | Haltekräfte der Experimente 1a und 1c . . . . .                                       | 35  |
| 3.3 | Haltekräfte der Experimente 8b und 9 . . . . .  | 36  |
| 3.4 | Haltekräfte der Experimente 2a und 2b . . . . .                                       | 37  |
| 3.5 | Kristallbaufehler im Siliziumwafer . . . . .  | 41  |
| 4.1 | Einstellungen der hinteren Düsenleiste . . . . .                                      | 55  |
| 4.2 | Bewertungsmatrix für die Auswahl der Sensoren zur Abstandsmessung . . . . .           | 59  |
| 4.3 | Widerstandsbeiwerte der Komponenten im Strang der hinteren Flachstrahldüsen . . . . . | 65  |
| 4.4 | Geodätische Druckverluste im Rohrleitungssystem . . . . .                             | 66  |
| 4.5 | Drücke und Durchflussmengen der oberen Kegeldüse . . . . .                            | 67  |
| 4.6 | Drücke und Durchflussmengen der hinteren Düsenleiste . . . . .                        | 67  |
| 5.1 | Verwendete Bereiche der Parameter des Versuchsstandes . . . . .                       | 76  |
| 5.2 | Einzel- und Gesamtkraft von oben . . . . .  | 78  |
| 5.3 | Kraft der hinteren Flachstrahldüsenleiste . . . . .                                   | 80  |
| 5.4 | Experimenteplan für die Untersuchungen am Versuchsstand . . . . .                     | 81  |
| 5.5 | Mittelwerte der relativen Höhe der vorderen und hinteren Waferkante . . . . .         | 90  |
| 6.1 | Ergebnisse der Vereinzelungsexperimente mit dem Prototypen . . . . .                  | 111 |
| 6.2 | Erfüllungsgrad der Anforderungen . . . . .  | 113 |



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Fertigung von Photovoltaikmodulen zur direkten Erzeugung von elektrischem Strom aus Sonnenlicht ist ein schnell wachsender Industriezweig. Hohe jährliche Zuwachsraten kennzeichnen das Wachstum der letzten Jahre. Diese Entwicklung wird auch für die weitere Zukunft prognostiziert (siehe auch Neidlein [2010], Pohl [2009], Shah [2009], Meyers [2009], Hoferichter [2009], Rogol [2009]). Verl [2010] hebt besonders die Rolle der Automatisierung in diesem Bereich hervor, welche die kostengünstige Fertigung bei gleichzeitiger hoher Qualität der Produkte ermöglicht.



Abbildung 1.1: Gesägte Wafer und Endstücke eines monokristallinen Siliziumstabes



Dominierend im Markt sind derzeit Module, die aus kristallinen Siliziumzellen bestehen. Diese besaßen im Jahr 2009 einen Anteil von über 80% an der weltweiten Produktionskapazität. (siehe auch Mehta [2009]). Prognosen über die zukünftigen Marktanteile zeigen vergleichsweise starke Abweichungen der verschiedenen Technologien, da angekündigte Erweiterungen von Produktionskapazitäten oft verschoben oder sogar annulliert werden. Die Studie der Landesbank Baden-Württemberg [12009] gibt für den Marktanteil von kristallinen Modulen im Jahre 2011 von noch 78% an. Es ist daher davon auszugehen, dass die kristalline Technologie auch in Zukunft einen großen Teil des Marktes bedienen wird. Produktionstechnische Verbesserungen in diesem Bereich sind daher auch in Zukunft erforderlich.

Das Ausgangsmaterial Silizium als Rohmaterial für die Wafer stellt in seiner hochreinen Form einen großen Anteil der Kosten für ein Photovoltaikmodul dar. Daher ist auch der Siliziumwafer, das Ausgangsmaterial für die Photovoltaikzelle, ein hoher Kostenfaktor. Zusammen mit dem Silizium bilden diese 33% der Kosten eines Photovoltaikmodules (del Cañizo u. a. [2009]). Darin enthalten sind die Kosten für die Erzeugung des hochreinen Siliziums sowie die Herstellung der Blöcke und das Sägen der Wafer. Die derzeitige einzige verfügbare industrielle Technik zur Herstellung der Wafer ist die Multidrahtsäge, welche in einem läppenden Verfahren die Wafer aus einem Block trennt. Der Block wird dazu auf eine Glasplatte geklebt, welche wiederum auf einen Werkstückträger geklebt wird. In einem mehrstündigen Prozess wird der Block dann durch das Drahtfeld geführt, wobei der Draht mittels einer kontinuierlichen Bewegung ein Abrasivmedium mitführt.

Die Kantenlänge der Wafer hat im vergangenen Jahrzehnt zugenommen. Früher waren 100 mm und 125 mm Kantenlänge üblich. Bei diesen Größen ist die Vereinzelung mittels manueller Arbeitsschritte möglich (siehe Gentischer [2006]). Ab der derzeitige gebräuchlichen Kantenlänge von 156 mm und der zukünftig möglichen von 210 mm ist die „traditionelle“ einhändige manuelle Vereinzelung nicht mehr möglich, da die typische Handspanne der Werker dies nicht mehr zulässt (siehe auch Abschnitt 2.6). Eine zweihändige Technik muss angewandt werden, die den Durchsatz vermindert und die Bruchrate erhöht. Die Einführung von Wafern mit einer Kantenlänge von mehr als 200 mm verzögert sich jedoch aus wirtschaftlichen Gründen, obwohl sie technologisch bereits seit mehreren Jahren erprobt wird (siehe auch von Aichberger [2004]). Alle Hersteller von Photovoltaik-Wafern streben eine Automatisierung des Vereinzelns an (siehe auch Treffert [2009]).

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung, Analyse und Bewertung eines Verfahrens, mit welchem Photovoltaikwafer nach dem Sägen mittels Flüssigkeitsstrahlen vereinzelt werden können. Basierend auf einem Versuchsstand wird das Modell des Vereinzelmehanismus' untersucht. Durch experimentelle Beobachtung und Auswertung werden die Wirkzusammenhänge des Verfahrens wissenschaftlich und technisch verständlich gemacht.

## 1.3 Anforderungen an einen Lösungsansatz

Für die zuverlässige Vereinzlung in der Praxis der industriellen Fertigung ergeben sich eine Reihe von sowohl quantitativen als auch qualitativen Anforderungen, die im Folgenden beschrieben werden:

- Der **Durchsatz** der Wafereinzlung richtet sich nach der direkt im Anschluss stattfindenden Reinigung der Wafer. Die Reinigung der Wafer erfolgt entweder in einem Durchlaufbad (Inline-Reinigung) oder in Kassetten, welche durch verschiedene Bäder geführt werden (Batch-Reinigung). Der heutige maximale Durchsatz in der Reinigung beträgt maximal 3600 Wafer pro Stunde (Treffert [2009]). Limitierend für den Durchsatz wirkt sich auch die Endkontrolle der fertigen Wafer am Ende der Linie aus. Ein derzeit häufig eingesetztes System leistet eine maximale Rate von 3400 Wafern pro Stunde. (Hennecke Systems GmbH [2010])
- Die **Kosten** für das Gesamtsystem sind die wirtschaftlich relevanten Größen, um die Anlage in der Produktion betreiben zu können. Dabei muss der Ansatz über die reinen Investitionskosten hinausgehen und die Gesamtkosten des Betriebs der Anlage mit einschließen („Cost of Ownership“). Die entscheidenden Kosten bei der Wafereinzlung sind dabei:
  - Investitionskosten gemessen am geforderten Durchsatz
  - Betriebskosten einschließlich Wartung der Anlage, Personal, Verbrauchsstoffe und Energie
  - Sonstige Kosten wie Flächenbedarf und zusätzlich benötigte Einrichtungen zum Betrieb der Vereinzlung

- Die **Bruchrate** der Wafer ist das entscheidende Merkmal für die Qualitätsbewertung des in der Anlage umgesetzten Verfahrens. Dabei ist die Bewertung der Bruchrate häufig umstritten, da die Ursache für Waferbruch nicht immer eindeutig zu bestimmen ist. Der Hauptbestandteil der Kontroverse ist das mögliche Vorhandensein von Vorschädigungen des Wafers, beispielsweise in Form von Mikrorissen (Larsson u. a. [2008]).
- Weitere Qualitätsmerkmale sind die Güte der Vereinzelung (**doppelte Wafer**), die Frequenz der notwendigen **manuellen Eingriffe** in den Prozess und die Bedienfreundlichkeit beim Beladen und Warten der Anlage. Die letzteren beiden Aspekte gehen auch in Durchsatz und Kosten der Anlage mit ein.

Zur Erfüllung dieser grundlegenden Anforderungen sind effiziente Anlagen, sowohl von der mechanischen Auslegung als auch von der Gestaltung der Steuerung, von entscheidender Bedeutung, um Produktionsstillstände zu vermeiden (vergleiche auch Verl [2007]).

### 1.4 Vorgehensweise

Ableitend von der beschriebenen Zielsetzung und den Anforderungen an einen Lösungsansatz wurde die Vorgehensweise für diese Arbeit definiert:

- Aufbereitung des Standes der Technik
- Grundlegende Untersuchungen zur Analyse und Klassifikation von Vereinzelungsverfahren
- Entwicklung eines Modells für die Vereinzelung von Photovoltaikwafern mittels Flüssigkeitsstrahlen
- Experimentelle Verifikation und Bewertung des Modells
- Umsetzung und Demonstration in einer prototypischen Anlage

Die Darstellung des Standes der Technik erfolgt unter Berücksichtigung ähnlich gelagerter Fragestellungen sowie der verfügbaren Literatur zur Vereinzelung von Wafern. Insgesamt liegt international vergleichsweise wenig Literatur zur industriellen Vereinzelung von flachen Werkstücken vor. Gleiches gilt verstärkt für die Vereinzelung von Siliziumsubstraten. Eine wichtige Quelle für den Stand der Technik sind Patente für die Vereinzelung von Wafern und ähnlichen Substraten.

Zur Auswahl und Bewertung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Verfahrens werden über den Stand der Technik hinausgehend, grundsätzliche Analysen zur Vereinzelung von Photovoltaikwafern dargestellt. Darauf aufbauend werden die Auswahl und die Entwicklung des vorgestellten Verfahrens erläutert. Dieses Verfahren wird in einem Modell erläutert, welches die verschiedenen Einflussfaktoren beschreibt und zueinander in Bezug stellt. Das Modell wird dann zunächst in einem Versuchsaufbau experimentell verifiziert und analysiert. Darauf aufbauend wird in einem vorindustriellen Prototypen das Vereinzelungsverfahren demonstriert, um die Umsetzbarkeit in der Praxis zu zeigen.



## 2 Ausgangssituation

### 2.1 Begriffe und Definitionen

#### 2.1.1 Photovoltaikwafer

Photovoltaikwafer sind quadratische Substrate aus Silizium mit einer typischen Kantenlänge von derzeit 156 mm. Wafer für den Einsatz in der Photovoltaik werden auch in der Spezifikation M6 der SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) definiert (SEMI [2008]). Dort werden vor allem geometrische Eigenschaften definiert, nicht jedoch die Dicke der Wafer.

Die früher üblichen Kantenlängen von 125 mm und 100 mm sind aber dennoch weiter in älteren Fertigungen in Gebrauch, wobei diese mit steigendem Kostendruck sukzessive stillgelegt werden, da größere Formate komparative Kostenvorteile bieten (siehe auch Herron und Wagner [2009]). Die Dicke der Wafer hat in den letzten Jahren abgenommen und liegt derzeit in den meisten Fertigungen bei 180-210  $\mu\text{m}$  (siehe auch Sinke u. a. [2009]). Es wird erwartet, dass der Trend zu dünneren Wafern auch in den nächsten Jahren anhält (SEMI PV Group Europe [2010]). Grund für die Reduzierung der Waferdicke ist vor allem der hohe Preis für das Ausgangsmaterial Silizium, welcher einen Kostenanteil von 33% (del Cañizo u. a. [2009]) bei der Herstellung der Wafer ausmacht.

Man unterscheidet Wafer in der Photovoltaikproduktion weiterhin nach Art der Kristallstruktur. Monokristalline Wafer besitzen eine uniforme Kristallstruktur, wie sie auch in der Halbleiterproduktion verwendet wird. Die Ausrichtung der Kristallstruktur ist dabei typischerweise  $\langle 100 \rangle$ , da dies eine spätere Texturierung der Zellen zur Leistungssteigerung ermöglicht (Luque und Hegedus [2009]). Multikristalline Wafer besitzen dagegen mehrere ungerichtete Kristallstrukturen. Dies führt zu Leistungsverlusten im Vergleich zu monokristallinen Zellen, insbesondere an den Korngrenzen der Kristallstrukturen. Polykristalline Wafer werden typischerweise mit Verfahren wie der EFG Ribbon Technologie hergestellt. Bei dieser Technologie entfällt das Sägen der Wafer, da diese direkt aus einer Siliziumschmelze gezogen werden (Lotsch [2009]).

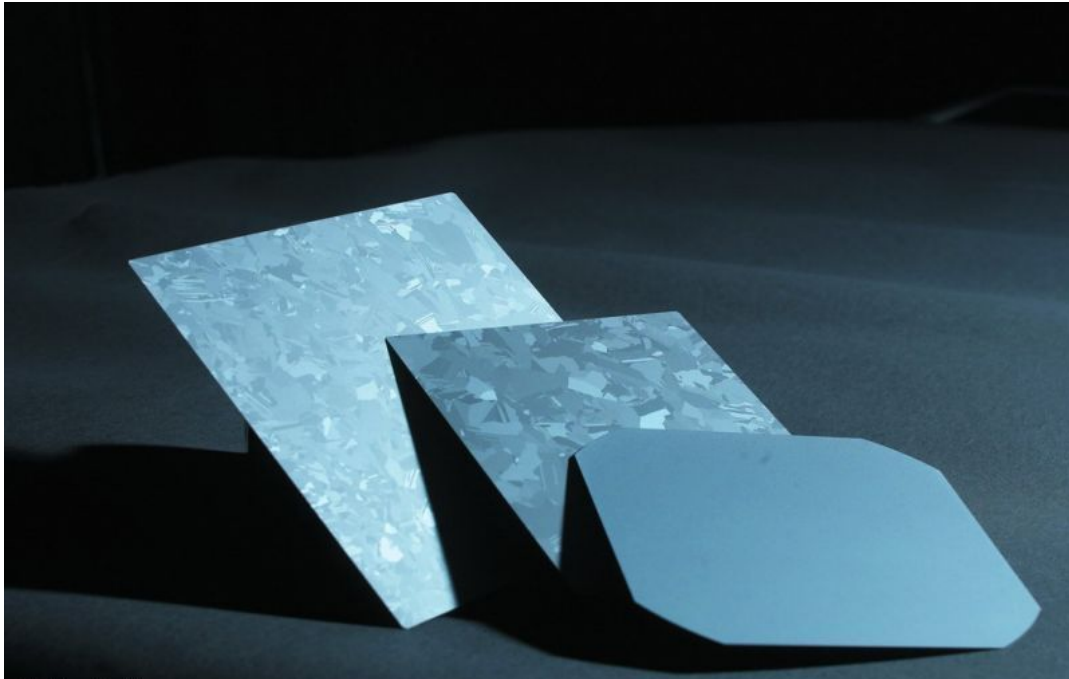


Abbildung 2.1: Mono- und multikristalline Wafer

Charakteristisch für alle Wafer ist die Bruchempfindlichkeit, bedingt durch die geringe Duktilität und Zähigkeit des Siliziums. Durch die geringe Dicke der Wafer führen Verformungen leicht zu Rissen im Material oder zum Bruch. Daher muss bei der Handhabung und Prozessierung der Wafer immer auch der Fokus auf eine schonende Bearbeitung gelegt werden (vergleiche auch Coletti u. a. [2006]).

### 2.1.2 Erläuterung der Prozesskette der Wafergewinnung

Das Ausgangsmaterial Silizium muss in einer hochreinen Form vorliegen, mit einem Reinheitsgrad von mehr als 99,99%, und wird als *Polysilizium* bezeichnet (vergleiche Wagemann und Eschrich [2007]). Das in granularer Form vorliegende hochreine Silizium wird für die Weiterverarbeitung eingeschmolzen, um kristalline Strukturen zu erzeugen. Die für diese Arbeit relevanten Technologien des Kristallziehens oder Blockgießens unterscheiden sich grundlegend. Das Kristallziehen erfolgt in der Photovoltaik typischerweise im Czochralski-Verfahren (Luque und Hegedus [2009]). Dabei wird mittels eines Impfkristalls aus einem rotierenden Tiegel in gegenläufiger Rotation der Einkristall in einem mehrstündigen Prozess gezogen. Das Ergebnis des Prozesses ist ein bis zu 2 Meter langer Einkristall (siehe auch Chunduri [2009]), welcher anschließend an vier Seiten quadriert wird. Als Kompromiss zwischen der Verringerung des dabei entstehenden Materialverlustes und späterer Ausnutzung der Fläche im Modul werden beispiels-

weise für 156 mm breite Wafer die 210 mm breiten runden Einkristalle nur bis zur einer Kantenlänge von 140,58 mm geschliffen. Damit unterscheiden sich die späteren monokristallinen Wafer optisch durch runde Ecken gegenüber der quadratischen Form der multikristallinen Wafer. Die Form dieser Wafer nennt man daher auch *semi-quadratisch*.

Demgegenüber werden multikristalline Wafer durch das Gießen eines Blockes gewonnen. Dazu wird das erhitzte, flüssige Silizium in eine Kokille gegossen. Durch allmähliches und definiertes Abkühlen entstehen *säulenförmige Mikrokristallite*. Dazu wird die Kokille von der unteren Seite her gleichmäßig nach oben abgekühlt, wodurch das Silizium entsprechend erstarrt. Dadurch entwickeln sich Mikrokristalle zu Säulen, welche die Kokille in vertikaler Richtung durchziehen. Das gebräuchlichste Verfahren ist dabei das Bridgman-Verfahren (Luque und Hegedus [2009]). Anschließend wird der Block in Säulen (Ingots) geschnitten, deren Grundfläche quadratisch in den Abmessungen der daraus entstehenden Wafer ist. Die weitere Prozesskette ist für beide Wafertypen praktisch identisch.

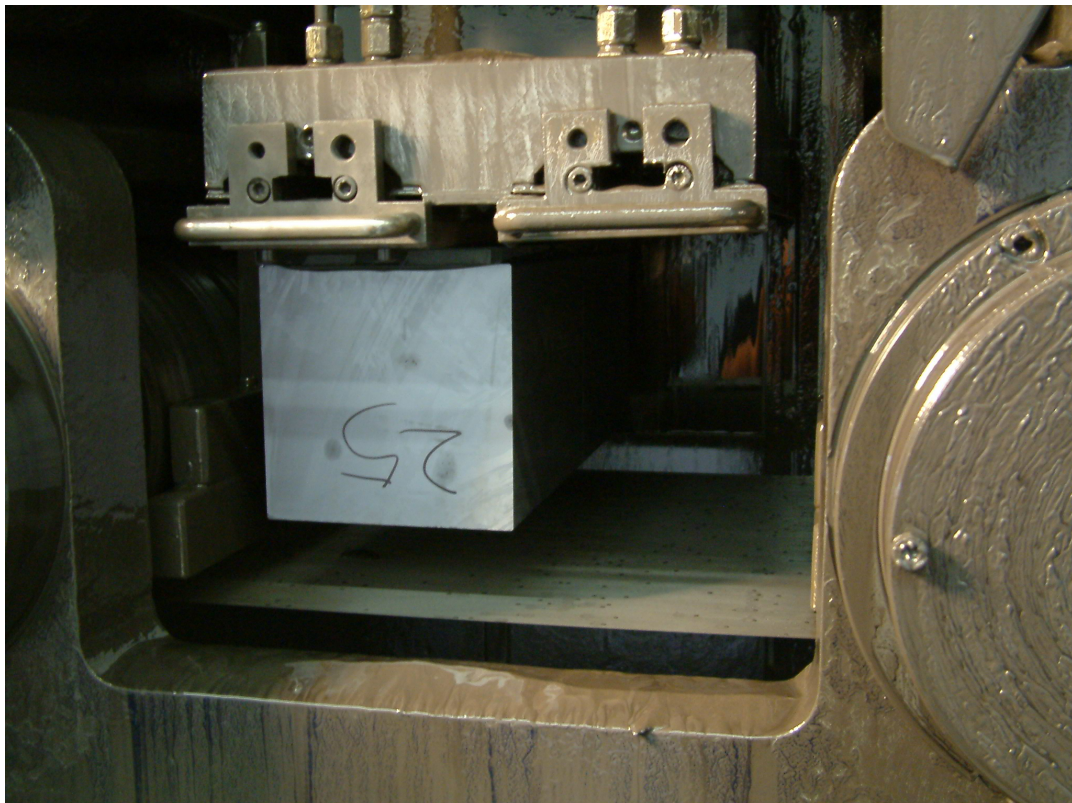


Abbildung 2.2: Ingot auf Werkstückträger vor dem Sägeprozess



Für den Schneideprozess in der Wafersäge müssen die Ingots auf spezielle Werkstückträger fixiert werden. In der Regel werden mehrere Ingots mit der Längsseite auf einen Werkstückträger geklebt, typischerweise aus Glas. Dieser wird wiederum auf einen weiteren Werkstückträger geklebt, der üblicherweise einen Schwalbenschwanz zur Aufnahme in die Multidrahtsäge besitzt (siehe Abbildung 2.2).

Nach dem Aushärten der Klebeverbindung wird der Ingot kopfüber mittels des Schwalbenschwanzes in die Aufnahme der Säge eingeführt und fixiert. Je nach Ausführung der Säge können auch mehrere Werkstückträger parallel bearbeitet werden. Die Kerbwirkung in der Säge wird durch ein Abrasivmedium erzeugt, welches durch einen Draht bewegt wird. Dieser Draht ist von einer Spule über Führungsrollen gespannt, welche über die gesamte Länge mit entsprechenden Kerben versehen sind. Daraus entsteht dann das sogenannte „Drahtfeld“. Der Abstand dieser Kerben definiert dabei die spätere Waferdicke. Während des Sägeprozesses wird nun der Draht konstant über die Führungsrollen bewegt und auf einer zweiten Spule wieder aufgewickelt. Als Abrasivmedium wird meist eine Mischung aus Glycol und Partikel aus Siliziumkarbid (SiC) verwendet, die „Slurry“ genannt wird (siehe auch Schumann u. a. [2009b]).

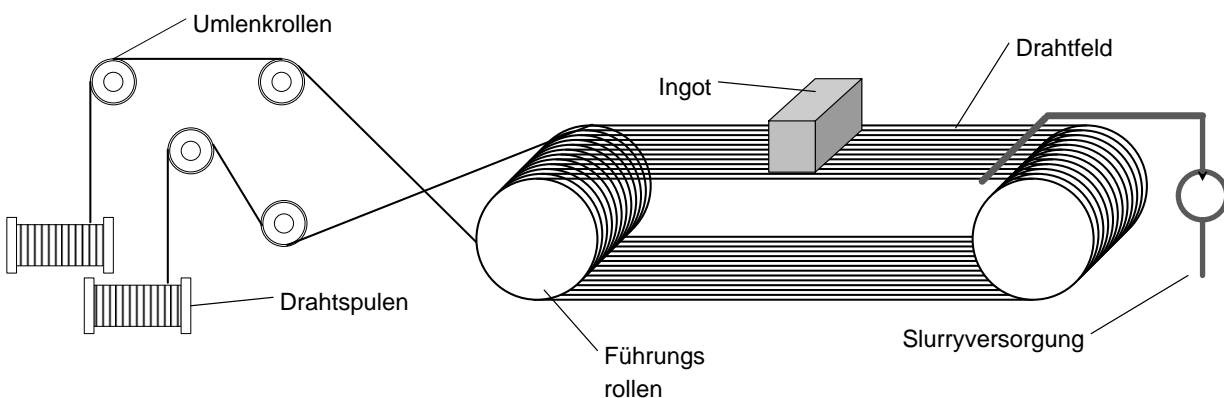


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Multidrahtsäge

In einem mehrstündigen Prozess werden die Ingots nun mit konstantem Druck durch das Drahtfeld geführt. Durch die Bewegung des Drahtes und die Zufuhr der Slurry entsteht dabei eine abrasive Wirkung, die den Ingot allmählich in die einzelnen Wafer trennt. Die Trennwirkung ist dann im eigentlichen Sinne kein sägendes, sondern ein läppendes Verfahren (siehe auch Anspach u. a. [2009]). Abbildung 2.3 zeigt schematisch die Struktur und die wichtigsten Komponenten einer Multidrahtsäge.

Der Ingot wird nun solange durch das Drahtfeld geführt, bis dieser vollständig in einzelne Wafer getrennt ist und auch ein Stück der Glasplatte eingekerbt ist. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in Abbildung 2.4 dargestellt. In der industriellen Fertigung werden Ingots teilweise sowohl durch das obere als auch durch das untere Drahtfeld geführt.

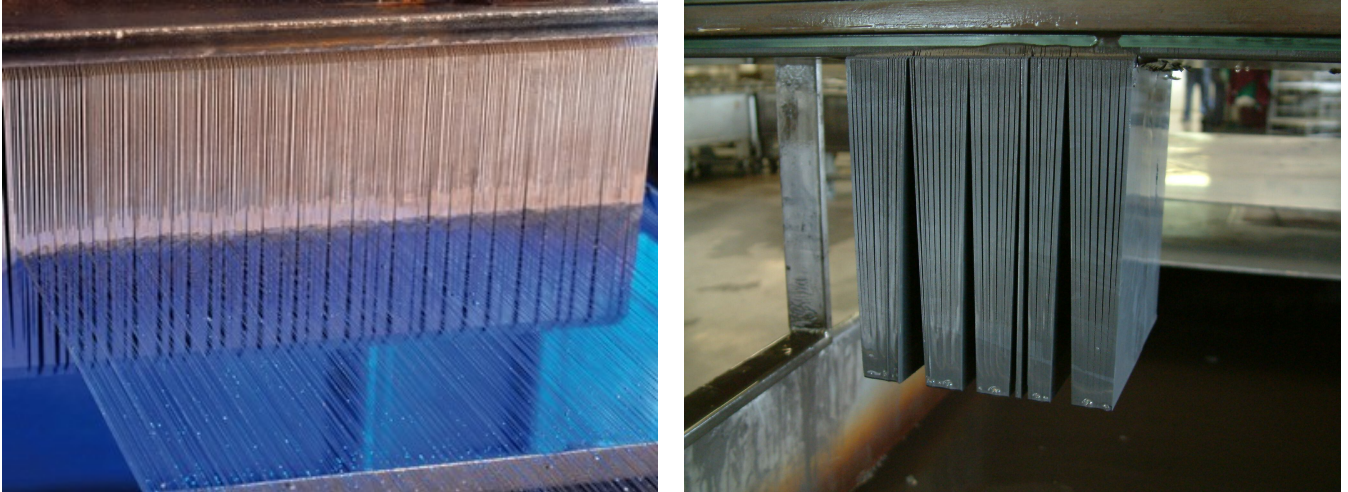


Abbildung 2.4: Gesägter Ingot im Drahtfeld und die anschließende Paketbildung der Wafer

Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 2.4 rechts die Ausbildung von „Waferpaketen“, sobald der Ingot aus dem Drahtfeld herausgezogen ist. Diese Paketbildung entsteht durch den geringen Abstand der Wafer zueinander (ca.  $140\ \mu\text{m}$ ), die Haftkräfte der feuchten Wafer und deren Biegsamkeit, hervorgerufen durch die geringe Dicke von  $180\text{-}210\ \mu\text{m}$ .

Die Wafer werden nun einer Vorreinigung unterzogen, bevor sie vereinzelt werden. Eine detaillierte Beschreibung des Vereinzeln findet sich in Abschnitt 2.4. Anschließend durchlaufen die Wafer eine Endreinigung, bei der ein Großteil der Slurryreste und der Siliziumpartikel abgereinigt wird. Abschließend erfolgt eine Qualitätskontrolle, bei der die Wafer auf Geometrie, Unversehrtheit und Optik überprüft und in verschiedene Klassen sortiert werden. Sofern die Fertigung der Solarzellen nicht direkt im Anschluss erfolgt, werden die Wafer in Boxen aus Polystyrol verpackt. Die Prozesskette von der Vorbereitung der Ingots bis zur Verpackung der Wafer ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

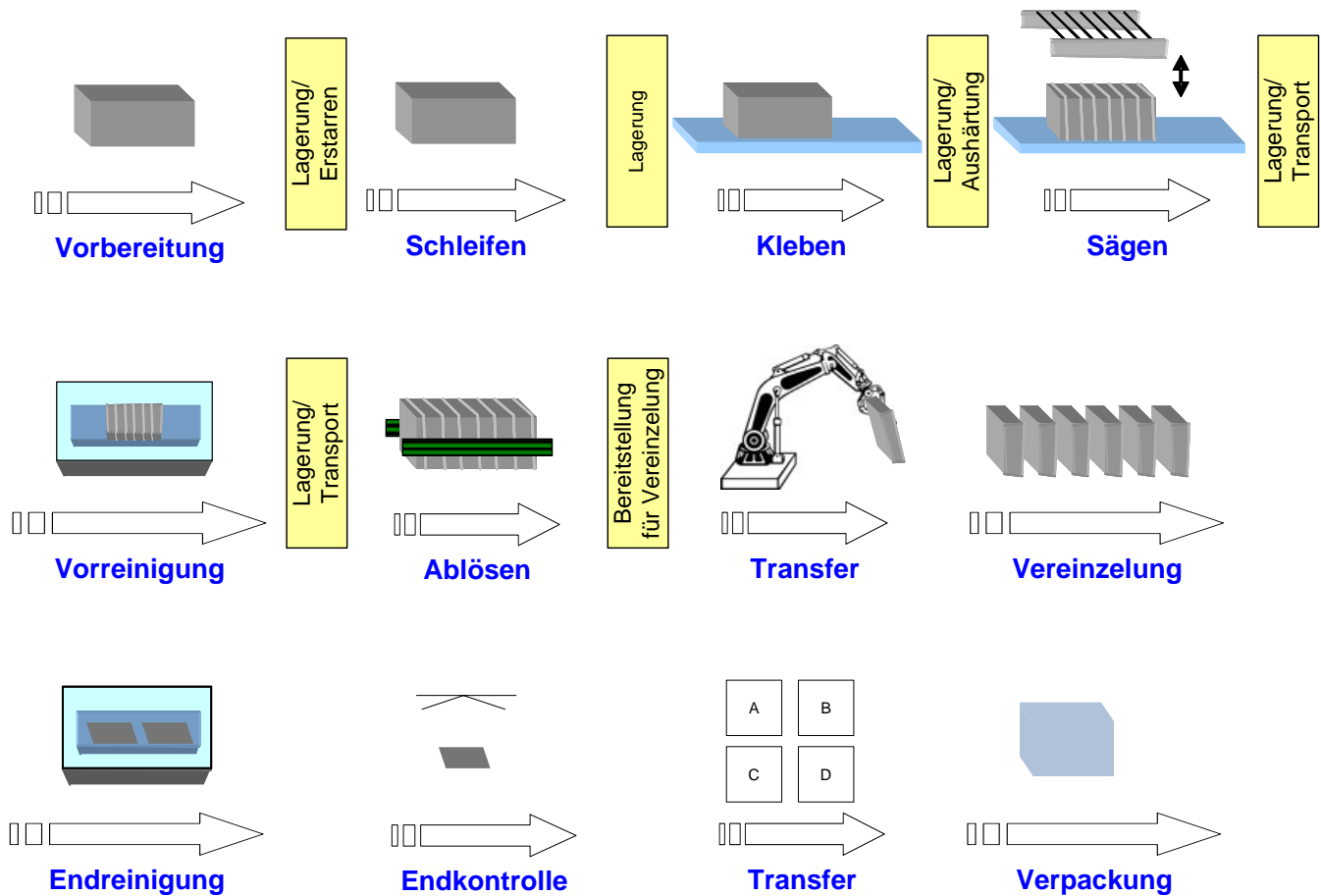


Abbildung 2.5: Überblick über die Prozesskette der Waferherstellung

## 2.2 Zustand der Wafer nach dem Sägen und der manuellen Vereinzelung

In einigen Fertigungen findet die Vereinzelung der Wafer nach wie vor teilweise oder vollständig manuell statt (siehe auch Reddig [2009]). Auch werden viele andere Handhabungsoperationen durch Werker ausgeführt. So findet beispielsweise der Transfer von der Säge zur Vorreinigung in den meisten Fertigungen manuell mit entsprechenden Transporthilfsmitteln statt (vergleiche auch Chunduri [2009]). Dabei wird der gesägte Ingot durch den Werker an den Manipulator eines flur- oder deckengebundenen Fördermittels fixiert und aus der Schwalbenschwanzführung herausgezogen. Der Ingot wird mit dem Fördermittel zur Vorreinigung weitertransportiert. In einigen Reinigungsanlagen zur Vorreinigung ist auch eine Ablösung (Entkittung) der Wafer vom Werkstückträger integriert (siehe auch Treffert [2009]). Von der Vorreinigung zur Vereinzelung kann der Transport entweder manuell oder auch automatisch erfolgen.

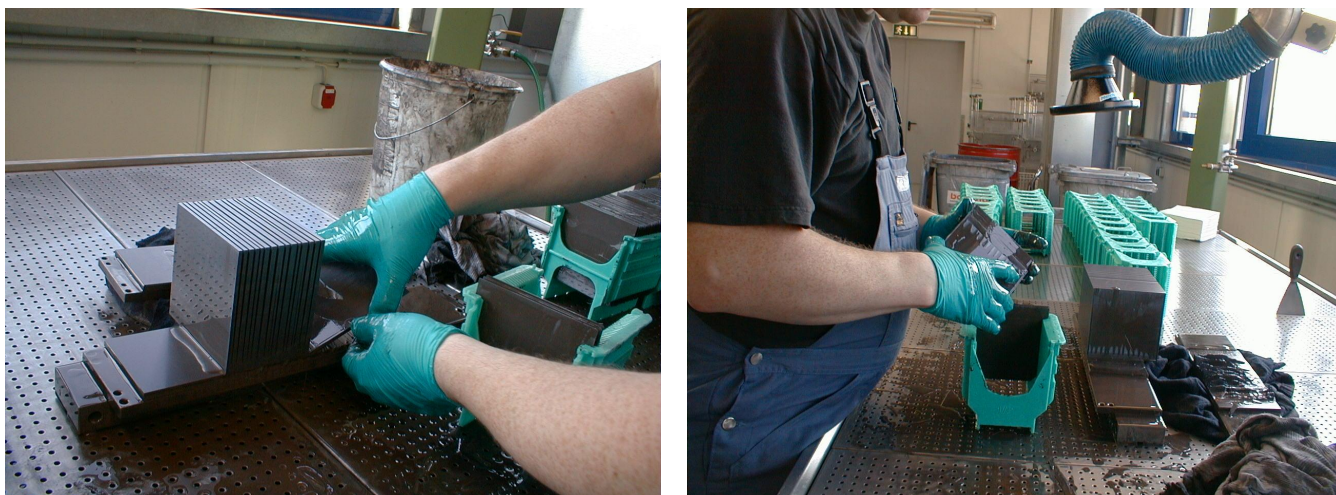


Abbildung 2.6: Manuelle Loslösung und Einordnung der Wafer in Reinigungskassetten

Die manuelle Vereinzelung findet nun typischerweise direkt vom Werkstückträger statt. Dazu wird dieser kopfüber auf die Arbeitsfläche gelegt. Der Werker nimmt nun eine Anzahl Wafer (vorzugsweise ein oder mehrere Pakete, welche durch die Adhäsion der Wafer entstanden sind) durch Abknicken an der Klebnaht vom Werkstückträger ab. Das Waferpaket wird dann Wafer für Wafer in Kassetten eingehordet, welche in eine Naßbank zur Reinigung verbracht werden (siehe Abbildung 2.6). Bei der Verwendung einer Inline-Reinigungsanlage werden die Wafer auf Förderbänder abgelegt.

Im Folgenden wird das Werkstück Siliziumwafer genauer in seinen Eigenschaften charakterisiert und mit anderen Werkstücken verglichen. Aufgrund der Aufgabe des mechanischen Vereinzelns wird der Vergleich mit anderen flächigen Werkstücken (auch *Flachteile* genannt) durchgeführt.

### 2.3 Stand der Technik bei der Handhabung von Flachteilen

Als Flachteile lassen sich Werkstücke bezeichnen, die eine flache Grundgeometrie aufweisen (siehe auch Hesse [2006]). Synonym wird oft auch der Begriff *Substrat* verwendet. Dabei ist ein Substrat ebenfalls ein Flachteil, wobei der Begriff Substrat typischerweise implizit andeutet, dass das Werkstück als Trägermaterial für weitere Stoffe verwendet wird. Wird das Werkstück dabei als dreidimensionaler Körper mit rechten Winkeln aufgefasst, ist eine Flächendimension des Körpers deutlich größer als die beiden anderen. Typische Beispiele für Flachteile sind Bleche, Glasscheiben, Papier, Textilien und Folien. Flachteile lassen sich demnach prinzipiell aufeinanderstapeln, so dass in bestimmten Situationen eine Vereinzelung der Flachteile erforderlich ist, beispielsweise in der Produktion. Sofern die Flachteile nicht bereits in

vereinzelter Form bereitgestellt werden, beispielsweise in einer Kassette mit Einzelaufnahmen, ist eine Vereinzelung erforderlich. Gängig ist eine Bereitstellung eines Stapels von Flachteilen für einen Prozessschritt, welcher jedoch auf einzelnen Werkstücken erfolgt. Für das Vereinzeln sind aus mechanischer Sicht folgende Materialeigenschaften von vorrangigem Interesse: Härte, Festigkeit, Elastizität, Plastizität, Duktilität, Risszähigkeit und Oberflächenrauheit.

Für die Vereinzelung weiterhin interessant sind Eigenschaften wie die Reflektivität der Oberfläche und weitere optische Eigenschaften, welche die Detektion durch optische Sensoren beeinflussen können.

In der Literatur sind viele unterschiedliche Methoden für die Vereinzelung von Flachteilen bekannt. Aufgrund der Vielfalt der Ausprägungen der beschriebenen Eigenschaften sind die Methoden selten auf andere Flachteilarten übertragbar. Papier ist ein bekanntes und alltägliches Beispiel für Flachteile und ist vielfach Thema in wissenschaftlichen Publikationen. So beschreibt Beyer [1966] ein Verfahren für die Vereinzelung von Papier mittels Saugdüsen. Die Vereinzelung von Textilmustern ist Thema bei Koch [1992]. Ebenfalls mit der Handhabung von Stoffzuschnitten beschäftigt sich Hou [1994]. Szimmat [2007] beschreibt die Vereinzelung von flächigen und biegeschlaffen Bauteilen anhand textiler Werkstücke.

Mit der Vereinzelung von Siliziumsubstraten beschäftigt sich Günzel [2007]. Jedoch wird hier das Schleifen und Vereinzeln von Halbleiterwafern beschrieben, welche nach der Produktion der elektronischen Bauteile geschliffen und in einzelne Bausteine zersägt werden. Dabei werden die runden Siliziumwafer flächig geschliffen, auf eine Folie geklebt und in die einzelnen Bauteile zersägt. Die Aufgabe der Vereinzelung liegt dabei auf dem Lösen und Abheben der einzelnen Bauteile von der Folie.

Die Vereinzelung von Flachteilen lässt sich somit anhand der Materialeigenschaften charakterisieren, wie dies in Tabelle 2.1 dargestellt ist. Erkennbar werden daraus unterschiedliche Eigenschaften der Werkstoffe, welche bei der Aufgabe der Vereinzelung angepasste Lösungen erfordern.

Tabelle 2.1: Qualitativer Vergleich typischer Materialeigenschaften verschiedener Flachteile  
(●: Hoch, ◐: Mittel, ○: Gering)

|                    | Bleche | Glasscheiben | Papier | Textilien | Folien | Si-Wafer |
|--------------------|--------|--------------|--------|-----------|--------|----------|
| Härte              | ●      | ●            | ○      | ○         | ○      | ●        |
| Festigkeit         | ●      | ●            | ○      | ◐         | ○      | ◐        |
| Elastizität        | ◐      | ○            | ◐      | ●         | ●      | ○        |
| Plastizität        | ●      | ○            | ○      | ○         | ○      | ○        |
| Duktilität         | ●      | ○            | ○      | ○         | ○      | ○        |
| Risszähigkeit      | ●      | ◐            | ○      | ○         | ○      | ○        |
| Oberflächenrauheit | ○      | ○            | ◐      | ●         | ○ - ●  | ○        |

## 2.4 Stand der Technik der automatischen Vereinzelung

Die umfangreichste Quellenart über die automatische Vereinzelung von Siliziumwafern sind Patentschriften. Besonders Firmen des Anlagenbaus haben in den letzten Jahren Entwicklungen zur Vereinzelung von Photovoltaikwafern durchgeführt, um den Waferherstellern Lösungen offerieren zu können. Diese sind größtenteils nicht in Publikationen beschrieben, jedoch häufig in Patenten, um die Schutzrechte auf die Erfindungen zu sichern. Daher wird zunächst eine Analyse der internationalen Patente vorgestellt.

### 2.4.1 Patentsituation

In der Tabelle 2.2 sind die relevanten Patente aufgelistet, welche die Vereinzelung von feuchten und kontaminierten Siliziumsubstraten oder ähnlichen Werkstücken als technische Lösung beinhalten. Ausgenommen dabei sind Patente, welche die Vereinzelung trockener Wafer beschreiben, da diesen durch die stark verminderte Adhäsion ein anderes Paradigma zugrunde liegt. Typischerweise wird dabei ein Separierungseffekt mittels Einblasen von Luft erzielt.

Im Folgenden werden die einzelnen Patente nun in ihrer Wirkungsweise beschrieben und miteinander verglichen. Dabei wird im Prinzip chronologisch anhand der Veröffentlichung der Patente vorgegangen. An einigen Stellen erscheint es jedoch zweckmäßig, zeitlich spätere Patente vorzuziehen, um Ähnlichkeiten zwischen den beschriebenen Lösungen zu verdeutlichen.

Dies trifft auch auf die zunächst analysierten vier Patente zu (DT 24 42 542, EP 0 414 157, US 2005/0056991 und WO 2006/125559), welche sich in ihrer Wirkungsweise stark ähneln. Zur Verdeutlichung des zu Grunde liegenden Verfahrensprinzips ist eine allgemeingültige zeichnerische Darstellung in Abbildung 2.7 wiedergegeben.

Im Patent **DT 2442542** wird die Vereinzelung beschrieben aus einem „[...] Stapel flacher Gegenstände, die zum Vereinzeln mittels einer Transportrolle aus einem bodennahen Schlitz ausstoßbar sind.“ Kroeker [1974] Dieses Patent aus dem Jahre 1974 beschreibt die Vereinzelung flacher, trockener Werkstücke, beispielsweise von Lochkarten, Magnetkarten oder Briefpostsendungen, wobei sich der Schwerpunkt der Erfindung auf die Umsetzung eines Verfahrens für Magnetkarten bezieht. Die Magnetkarten werden mittels einer Transportrolle vereinzelt, welche die unterste Magnetkarte unterhalb einer Barriere (hier „Schranke“ genannt) hervorzieht. Um eine gleichmäßige Andruckkraft auf die Magnetkarten zu erreichen, wird die Verwendung einer Andruckplatte beschrieben, welche mittels einer Konstruktion aus Elektromagnet und

Tabelle 2.2: Patentsituation bei der Wafervereinzlung und ähnlicher Substrate

| Patentname   | Patentnummer    | Jahr | Erfinder                   | Anmelder                              |
|--|-----------------|------|----------------------------|---------------------------------------|
| Magazin für einen Stapel flacher Gegenstände   | DT 2442542      | 1974 | Kroeker, Elmer;            | International Business Machines Corp. |
| Blank feeder and method for controlling the same   | EP 0414157      | 1991 | Sawada, Tetsuya et al.     | Rengo Co.                             |
| Wafer processing system  | EP 0762483      | 1997 | Miyazaki, Takeshiro et al. | Nippei Toyama Corporation             |
| Vorrichtung zum Ablösen, Vereinzeln und Einlagern von dünnen, bruchempfindlichen scheibenförmigen Substraten             | DE 19904834     | 2000 | Günter, Ernst              | ACR Automation in Cleanroom GmbH      |
| Verfahren und Einrichtung zum Vereinzeln von scheibenförmigen Substraten   | WO 01/28745     | 2001 | Gentischer, Josef          | ACR Automation in Cleanroom GmbH      |
| Verfahren und Vorrichtung zum Vereinzeln von scheibenförmigen Substraten, insbesondere zur Waferherstellung              | DE 19900671     | 2002 | Güthenke, Gunnar et al.    | Fraunhofer Gesellschaft               |
| Vorrichtung für das Einlegen von durch Zersägen eines Rohlings erhaltenen Wafern in Aufbewahrungselemente                | EP 0802028      | 2003 | Hauser, Charles            | HCT Shaping Systems SA                |
| Blattzuführgerät   | EP 0990609      | 2003 | Tomiyaama, Katsuya et al.  | NEC Corp.                             |
| Sheet material processing  | US 2005/0056991 | 2005 | Sullivan, John Anthony     | Bracewell & Patterson, LLP            |
| Einrichtung zum Vereinzeln von Substraten vom Stapel   | WO 2006/125559  | 2006 | Jäger, Felix et al.        | ACI-Ecotec GmbH & Co.KG               |
| Vorrichtung zum Ablösen, Vereinzeln und Transportieren von in einer Halteeinrichtung sequenziell angeordneten Substraten | DE 102005016519 | 2007 | Bürger, Norbert et al.     | Rena Sondermaschinen GmbH             |
| Verfahren zur Vereinzlung von scheibenförmigen Substraten unter Nutzung von Adhäsionskräften                             | WO 2007/054525  | 2007 | Coenen, Wolfgang et al.    |                                       |
| Vereinzlungsvorrichtung und Verfahren zur stückweisen Bereitstellung plattenförmiger Gegenstände                         | DE 102006011870 | 2007 | Renn, Siegfried            | Insotech OHG                          |
| Vorrichtung und Verfahren zum Vereinzeln und Transportieren von Substraten   | EP 1935599      | 2008 | Herter, Richard            | Rena Sondermaschinen GmbH             |

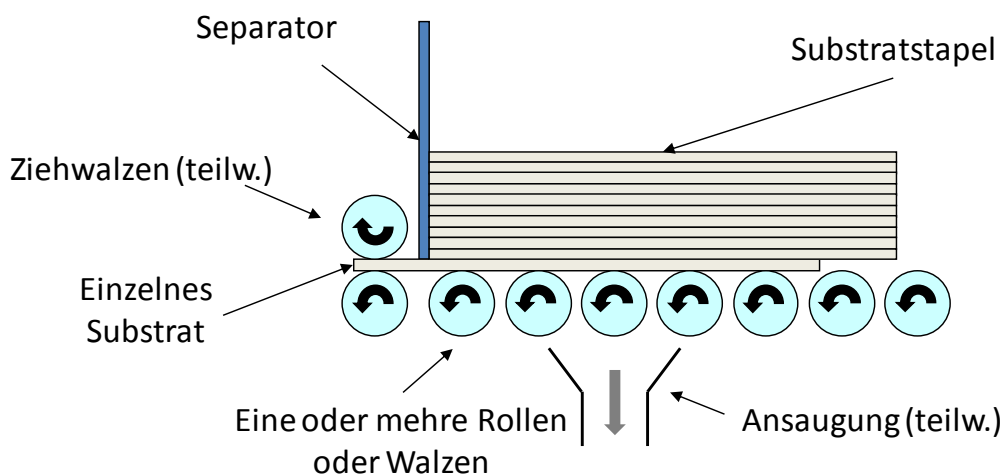


Abbildung 2.7: Prinzip der rollenbasierten Vereinzlung

Blattfeder eine Kraft von 4 Newton auf die unterste Magnetkarte aufbringen soll. Dadurch soll die Anpresskraft zwischen 4 Newton (bei fast leerem Magazin) und 6,8 Newton bei gefülltem Magazin gehalten werden. Im beschriebenen Anwendungsfall waren die Magnetstreifen 3,12 mm dick.

Das Patent **EP 0414157** (Sawada u. a. [1990]) aus dem Jahre 1990 beschreibt ein Vereinzelungsverfahren für vornehmlich glatte oder gewellte Werkstücke aus Faserstoffen. Das Vereinzelungsprinzip ist jedoch dem vorher beschriebenen Verfahren sehr ähnlich. Das Patent hat weiterhin zum Ziel, Verfahren zu ersetzen, welche mit Stoß- oder Schiebeeinrichtungen arbeiten. Bei diesen Verfahren wird das unterste Werkstück mittels einer geeigneten Vorrichtung aus dem Stapel herausgeschoben oder -gestoßen, wobei auch hier eine Barriere für die oberen Werkstücke zum Einsatz kommt. Die Patentschrift hebt jedoch den Nachteil hervor, dass durch Stoßen oder Schieben die Kante des Werkstückes beschädigt wird oder gewellte Werkstücke nur unzureichend erfasst werden. Das Patent beschreibt zwei unterschiedliche Ausführungen des Verfahrens. In der ersten Ausführung wird auf einen Schieber verzichtet, in der zweiten Ausführung kommt dieser trotz der beschriebenen Nachteile zum Einsatz. Beiden Ausführungen gemein ist der Einsatz dreier Rollen in der Nähe der Barriere sowie einer darunter ausgeführten und gekapselten Vakuumsaugung. Mithilfe dieser Ansaugung soll genügend Haftreibung zwischen Werkstück und Rollen erzeugt werden. Weiterhin sind gegenläufige Rollen hinter der Barriere vorgesehen, die das Werkstück nach erfolgter Vereinzelung vollständig aus der Apparatur hinausziehen sollen. Dazu hebt das Patent auch die Notwendigkeit hervor, alle Rollen (Förder- und Ziehrollen) synchron anzutreiben, um eine Stauchung oder Streckung der Werkstücke zu vermeiden. Gleiches gilt für den Einsatz eines Schiebers, der über eine geeignete Vorrichtung für eine fixe Werkstücklänge synchronisiert werden kann.

Das Patent **US 2005/0056991** (Sullivan [2004]) aus dem Jahre 2004 beinhaltet einen Großteil der Merkmale des Patent EP 0414157. Neben der Möglichkeit des Einsatzes von Vakuum zur Erhöhung des Anpressdrucks an die Förderrollen wird zusätzlich der Einsatz einer Vakuumsaugung im hinteren Bereich der Werkstücke beschrieben, um diese solange zurückzuhalten, bis das vorherige Werkstück vollständig vereinzelt ist. Die Patentschrift weist auch darauf hin, dass geeignete Materialien für die Rollen verwendet werden müssen, um gleichermaßen ausreichend Haftreibung zwischen Werkstück und Rollen zu erzeugen als auch den Abrieb der Rollen auf dem Werkstück zu minimieren. Das Patent schlägt dafür Kunststoffe wie etwa PTFE vor. Auch dieses Patent geht auf die Notwendigkeit des synchronen Antriebs der Förder- und Ziehrollen ein. Die Förderrollen wiederum sind dabei umlaufend mit rechteckigen Nuten versehen, dergestalt dass diese so ineinander verzahnt montiert werden können, dass sich die Auflagefläche der



Werkstücke auf die Förderrollen dabei vergrößert. Dadurch entstehen geringere punktuelle Lasten auf das Werkstück, was ebenfalls im nachfolgend beschriebenen Patent genutzt wird. Als weitere Möglichkeit zur Förderung der Werkstücke wird auch der Einsatz eines Gurtförderers vorgeschlagen, welcher zusätzlich noch mit einer Vakuumsaugung zur Erhöhung der Haftreibung ausgestattet werden kann. Das Patent hat zunächst Werkstücke wie etwa Wellpappe als Zielobjekt. Daher wird auch die Möglichkeit beschrieben, nach erfolgter Vereinzelung direkt weitere Prozesse anzuschließen, beispielsweise Stanzen oder Drucken.

Als letztes Patent, welches die rollenbasierte Vereinzelung verwendet, wird nun näher auf **WO 2006/125559** (Jäger u. a. [2006]) aus dem Jahre 2006 eingegangen, da dieses sich explizit auf die Vereinzelung von Photovoltaikwafern bezieht. Dieses Patent geht auf die besonderen Anforderungen dieses Werkstückes ein, die sich größtenteils auf die Bruchempfindlichkeit der Wafer beziehen. Zusätzlich wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, die Wafer feucht zu halten, um Antrocknungen zwischen den Wafern und an der Oberfläche zu vermeiden. Durch die Wahl der im vorherigen Patent beschriebenen Verzahnung der Walzen wird weiterhin die Auflagefläche für die Wafer vergrößert. Das Patent sieht die Möglichkeit vor, den Stapel mit einem Stempel definiert zu beschweren, um den Anpressdruck auch bei kleiner werdender Stapelhöhe beizubehalten. Wie in den anderen Patenten wird eine Barriere vorgeschlagen, die sich auf die jeweilige Dicke der Wafer einstellen lässt. Nach der Barriere soll ein Paar gegenläufiger Walzen, welche elastisch gelagert sind, den Wafer vollständig herausziehen.

Das Patent, welches nun erläutert wird, beschreibt eine mehrstufige Anlage, welche gesägte Ingots für die Halbleiterindustrie verarbeitet und zu Wafern vereinzelt. Das Patent mit der Nummer **EP 0762483** (Miyazaki u. a. [1996]) hat daher auch den Namen „Wafer Processing System“. Der Hauptanwendungsfall des Patentes sind Wafer für die Halbleiterindustrie, die im überwiegenden Fall aus Silizium bestehen. Der Unterschied zur Photovoltaik ist dabei die Form (kreisrund), Größe, heutzutage meist 200-300 mm Durchmesser, und die Dicke, nämlich 725 µm bei 200 mm und 775 µm bei 300 mm Durchmesser (siehe SEMI [2002]). Im Gegensatz zur Photovoltaik sind die Kosten für die Wafer kein entscheidender Bestandteil für die gesamte Wertschöpfungskette der fertigen integrierten Schaltkreise (Reddig [2007]). Die Prozesskette der vorgeschlagenen Anlage umfasst die Vorreinigung der Wafer, welche noch am Werkstückträger befestigt sind, die Loslösung vom Werkstückträger und die anschließende Vereinzelung.

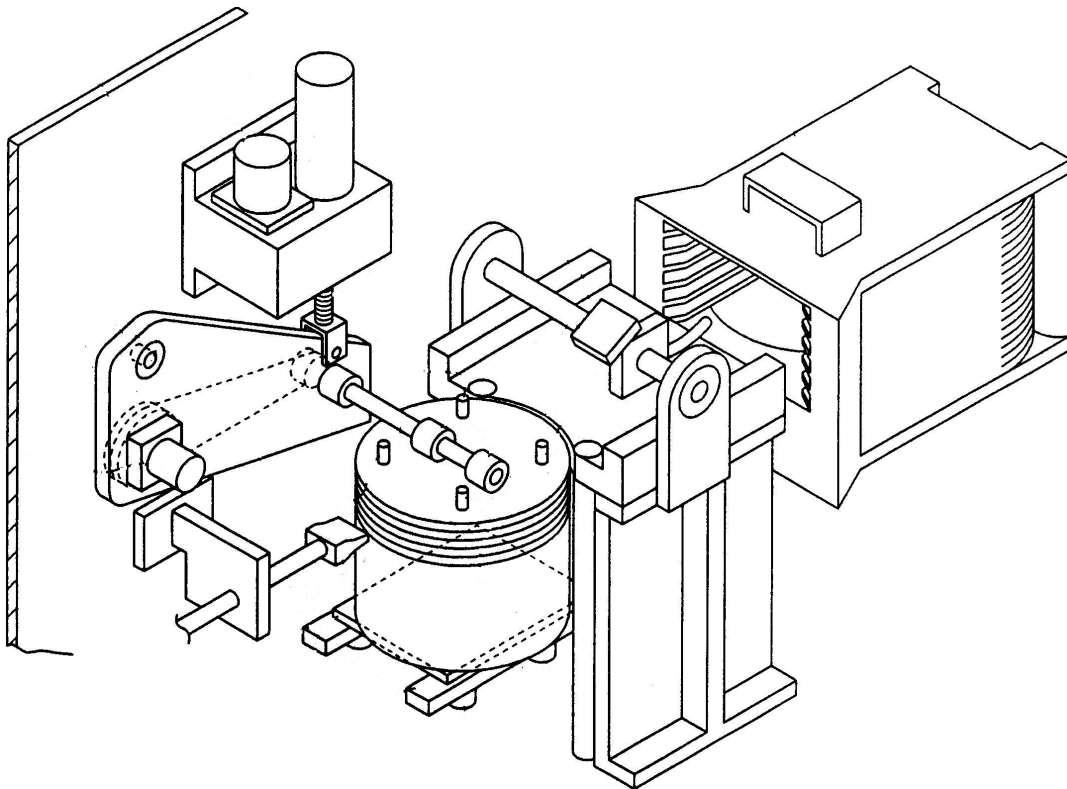


Abbildung 2.8: Vereinzelungsprinzip des Patentes EP 0762483 (aus Miyazaki u. a. [1996])

Der eigentliche Teil der Vereinzelung beginnt mit der Loslösung vom Werkstückträger. Das Patent schlägt dazu vor, den Werkstückträger mit den gesägten Wafern kopfüber in eine Aufnahme zu stellen. Durch Hinzunahme von Lösungsmitteln und/oder heißem Wasser wird der Kleber dann in einem Bad aufgelöst und der Werkstückträger entfernt. Die gelösten Wafer sollen dann in einem Container aufgefangen und weiter transportiert werden. Der Container wird für die Vereinzelung um  $90^\circ$  gedreht, so dass die Wafer im Stapel horizontal aufeinander liegen. Der Container mit dem Waferstapel wird auf eine vertikal verschiebbare Plattform transferiert, welche den Stapel vollständig in einen Behälter eintaucht, der mit einer geeigneten Flüssigkeit gefüllt ist. Die Plattform wird zur Separation des obersten Wafers so bewegt, dass der erste Wafer die Oberfläche der verwendeten Flüssigkeit durchbricht. Die Vereinzelung erfolgt mittels eines verschiebbaren Armes, welcher den obersten Wafer in eine Rinne schiebt. Die nachfolgenden Wafer werden dabei von einer oder mehreren Kunststoffkomponenten zurückgehalten. Die Vereinzelung wird zusätzlich durch Düsen unterstützt, welche Flüssigkeit zwischen dem jeweils obersten und dem nachfol-

genden Wafer einbringt. Alternativ kann der Waferstapel auch mit einem Winkel angestellt werden, um die Gravitationskraft zur Unterstützung der Vereinzelung zu verwenden. Die vereinzelt Wafer werden in einer Kassette gesammelt. Das Vereinzelungsprinzip ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

Die Patentschrift **EP 802028** (Hauser [1997]) beschreibt die Vereinzelung von Wafern oder ähnlichen Substraten direkt vom Werkstückträger. Dieser wird mit den Wafern unterhalb des Werkstückträgers in eine Aufnahme eingespannt, welche in der Horizontalen verschiebbar ist. Eine Bandsäge, ein Sägeblatt oder eine ähnliche Vorrichtung trennt nun den ersten Wafer mechanisch vom Werkstückträger. Die Vereinzelung wird dabei noch von einer Flüssigkeitsdüse unterstützt. Der gelöste Wafer soll dann auf ein darunter liegendes Transportband fallen und über eine mit Flüssigkeit beaufschlagte Rutsche in eine Kassette gleiten.

Das nächste untersuchte Patent **WO 01/28745** (Gentischer [2000]), welches wiederum wie DE 19904834 von der Firma ACR Automation in Cleanroom GmbH angemeldet wurde, hat ebenfalls die direkte Vereinzelung vom Werkstückträger zum Ziel. Dazu wird der Werkstückträger mit dem gesägten Ingot auf eine in horizontaler Richtung verschiebbare Einrichtung gestellt. Die Vereinzelung erfolgt durch den Einsatz von Sauggreifern, die sich an einem beweglichen Arm befinden. Dieser Arm kann sowohl in vertikaler Richtung bewegt werden, als auch eine oszillierende Bewegung mit der Klebnaht als Mittelpunkt durchführen. Zusätzlich kann der ganze Arm geschwenkt werden, um den vereinzelt Wafer einer Transporteinrichtung zu präsentieren. Die Separierung des zu vereinzelt Wafers soll durch den Einsatz eines Flüssigkeitsstrahls aus einer Schlitzdüse unterstützt werden. Durch Sensoren gesteuert wird nun der Werkstückträger Wafer für Wafer an den Sauggreifer herangeführt. Eine Zeichnung sowie die Realisierung in einem Prototypen sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

Die Patentschrift **DE 19900671** beschreibt ein Verfahren, bei welchem die Wafer direkt vom Werkstückträger vereinzelt werden sollen (siehe Güthenke u. a. [2002]). Dazu ist der Werkstückträger mit einer Aussparung versehen, durch welche mittels einer Düse Flüssigkeit eingebracht werden kann. Dieser Flüssigkeitsstrahl soll den vordersten Wafer von dem nachfolgenden separieren, während diese noch mit der Klebnaht am Werkstückträger haften. Eine weitere Düse soll von der anderen Seite den vordersten Wafer in einem Winkel anstrahlen, so dass eine Kraft ausgeübt wird, welche den Wafer in Richtung einer Aufnahmevorrichtung abknickt. Diese Aufnahmevorrichtung kann beispielsweise aus Sauggreifern bestehen. Dadurch soll die Klebnaht geschwächt werden, so dass die Aufnahmevorrichtung den Wafer abtransportieren kann. Zur besseren Loslösung von der Klebnaht soll ein Stößel oder eine Schneidevor-

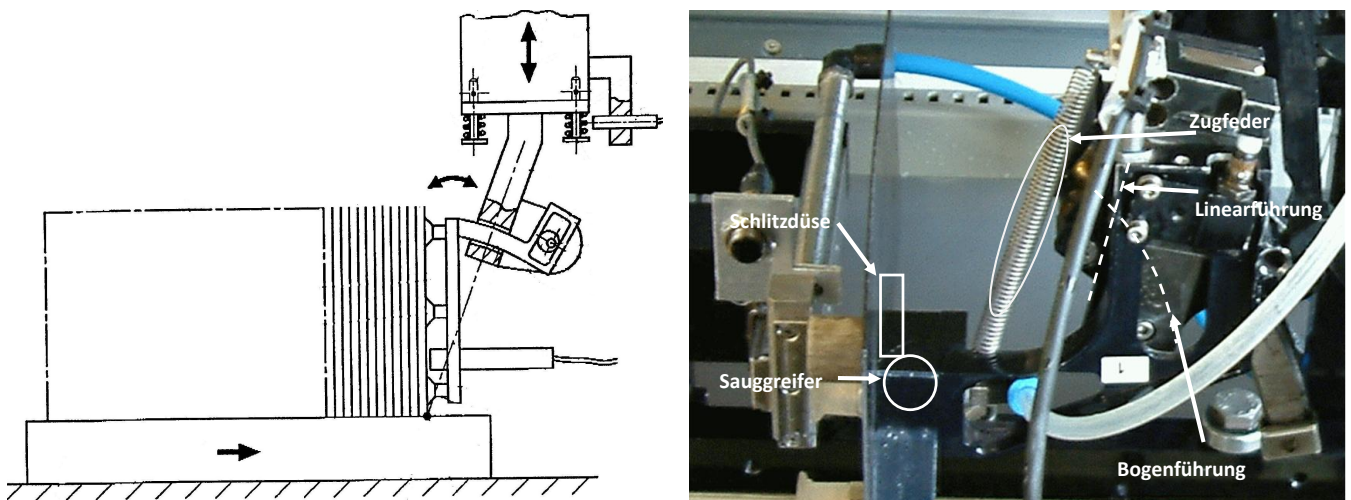


Abbildung 2.9: Zeichnung des Patentes WO 01/28745 und Realisierung als Prototyp

richtung diese schwächen oder unterbrechen. Der Vereinzelungsvorgang ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Das Patent empfiehlt zum besseren Abtransport der Flüssigkeit und der Slurryreste den Werkstückträger hängend mit den Wafern nach unten anzuordnen.

Das Patent **DE 19904834** (Günter [1999]) hat wiederum die Vereinzelung von Photovoltaikwafern als primäres Ziel. Darin wird vorgeschlagen, dass der Werkstückträger mit den gesägten Wafern aufrecht in ein Bad gestellt wird, so dass sich die Wafer in einer horizontalen Position befinden (siehe Abbildung 2.11). Der Werkstückträger kann dabei mit einem Hubwerk in vertikaler Richtung bewegt werden. Mittels eines Schneidwerkzeuges soll nun der jeweils oberste Wafer gelöst werden. Der gelöste Wafer wird dann durch einen Flüssigkeitsstrom über ein „rinnenförmiges Wehr“ gespült. Am Ende des Wehres befindet sich eine Kassette. In deren Aufnahmeschlitz soll dann der Wafer gespült werden, wobei sich die Kassette in vertikaler Richtung nach oben bewegen lässt, um einen freien Slot für den nachfolgenden Wafer bereitzustellen.

Das Patent **DE 102005016519** (Bürger u. a. [2005b]) schlägt die Vereinzelung aus einem bis auf einen definierten Winkel senkrecht stehenden Stapel bereits gelöster Wafer vor (siehe Abbildung 2.11). Das Verfahren soll grundsätzlich im Wasser durchgeführt werden, so dass Auftrieb und Gewichtskraft der Wafer den Vereinzelungsprozess unterstützen können. Ein Mitnehmer soll nun den vordersten Wafer ergreifen und nach oben über die Kante der nachfolgenden Wafer hinausziehen und ab einer gewissen Höhe

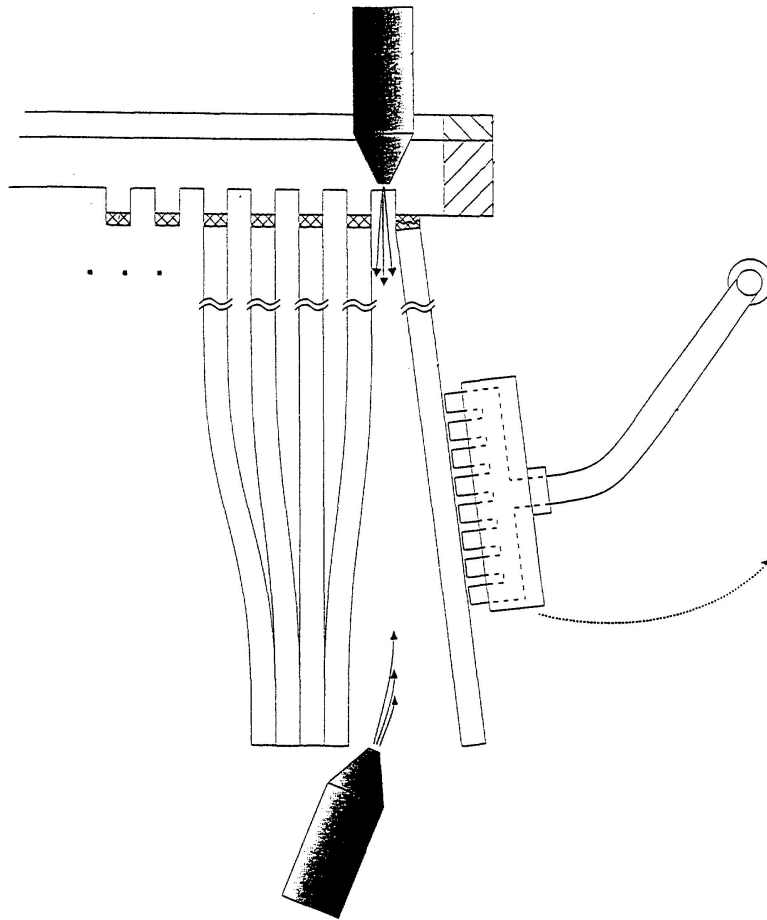


Abbildung 2.10: Darstellung des Patentes DE 19900671 C2 (aus Güthenke u. a. [2002])

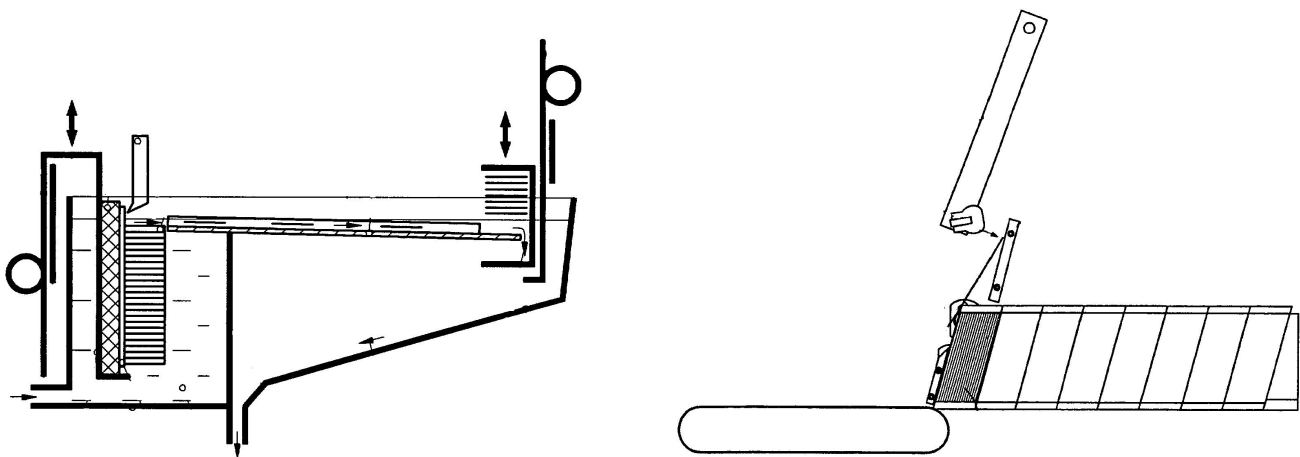


Abbildung 2.11: Darstellung des Patentes DE 19904834 (aus Günter [1999]) (links) und des Patent DE 102005016519 (aus Bürger u. a. [2005b]) (rechts)

den vereinzelt Wafer nach vorne abkippen. Der so gelöste Wafer soll dann durch seine Gewichtskraft auf ein darunter liegendes Förderband absinken und abtransportiert werden. Die Vereinzelung soll durch Düsen unterstützt werden, die den vordersten Wafer vom Rest des Stapels trennen.

Auf die Problematik variierender Waferdicken und die damit einhergehende Zunahme der Bruchempfindlichkeit an den Waferrändern geht das Patent **WO 2007/054525** (siehe Coenen und Coenen [2006]) ein. Das Grundprinzip basiert auf der Etablierung einer Adhäsionskraft zwischen dem zu vereinzeln Wafer und eines vollflächigen Greifers mit entsprechender Oberfläche. Für die Oberfläche schlägt das Patent eine feinstrukturierte, hydrophile Oberfläche aus Kunststoff vor. Damit soll eine gute Adhäsion zwischen dem Greifelement und dem Wafer etabliert werden. Die Vereinzelung soll von einem Stapel Wafer erfolgen, welche vollständig vom Werkstückträger gelöst sind. Zur Separierung des gegriffenen Wafers von diesem Stapel soll ein Abstreifelement (Rückhaltevorrückung) zum Einsatz kommen, welches die Wafer im Stapel zurückhalten soll. Diese Rückhaltevorrückung kann entweder als bewegliches Element oder feststehend ausgebildet werden. Im letzteren Fall muss dann der Waferstapel bewegt werden. Zur Erkennung von Bruch oder nicht vollständigen Wafern sollen bildgebende Verfahren eingesetzt werden. Nach erfolgter Vereinzelung soll der Wafer mittels eingespülten Wassers oder anderer Methoden vom Greifer gelöst und auf ein Förderband oder eine andere Aufnahme abgelegt werden.

Das Patent **DE 102006011870** verwendet für die Vereinzelung Gurtförderer (siehe Renn [2006]). Dabei werden die Wafer wiederum zunächst vollständig vom Werkstückträger gelöst und der Vereinzelungsvorrichtung im Stapel präsentiert. Das Patent gibt als bevorzugte Ausrichtung eine vertikale Position des Waferstapels an. Der Gurtförderer, welcher die Wafer vom Stapel abgreift, soll entsprechend perforiert oder mit geeigneten Öffnungen versehen sein, damit ein Unterdruck zur Fixierung des Wafers etabliert werden kann. Der Stapel soll nun an die Gurtfördereinheit herangetaktet werden. Zur Separierung des gegriffenen Wafers von den nachfolgenden werden mechanische (z.B: Abstreifer) oder fluidische Methoden vorgeschlagen. Die Methode ist für den Betrieb in Umgebungsluft beschrieben, jedoch wird als bevorzugte Ausführung der Betrieb in einer Wanne angegeben, so dass der Waferstapel vollständig mit Flüssigkeit bedeckt ist. Der Unterdruck zur Fixierung des Wafers soll durch Ansaugung der Flüssigkeit realisiert werden. Der vereinzelt Wafer soll von weiteren Förderbändern übernommen und abtransportiert werden. Die Vorrichtung ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

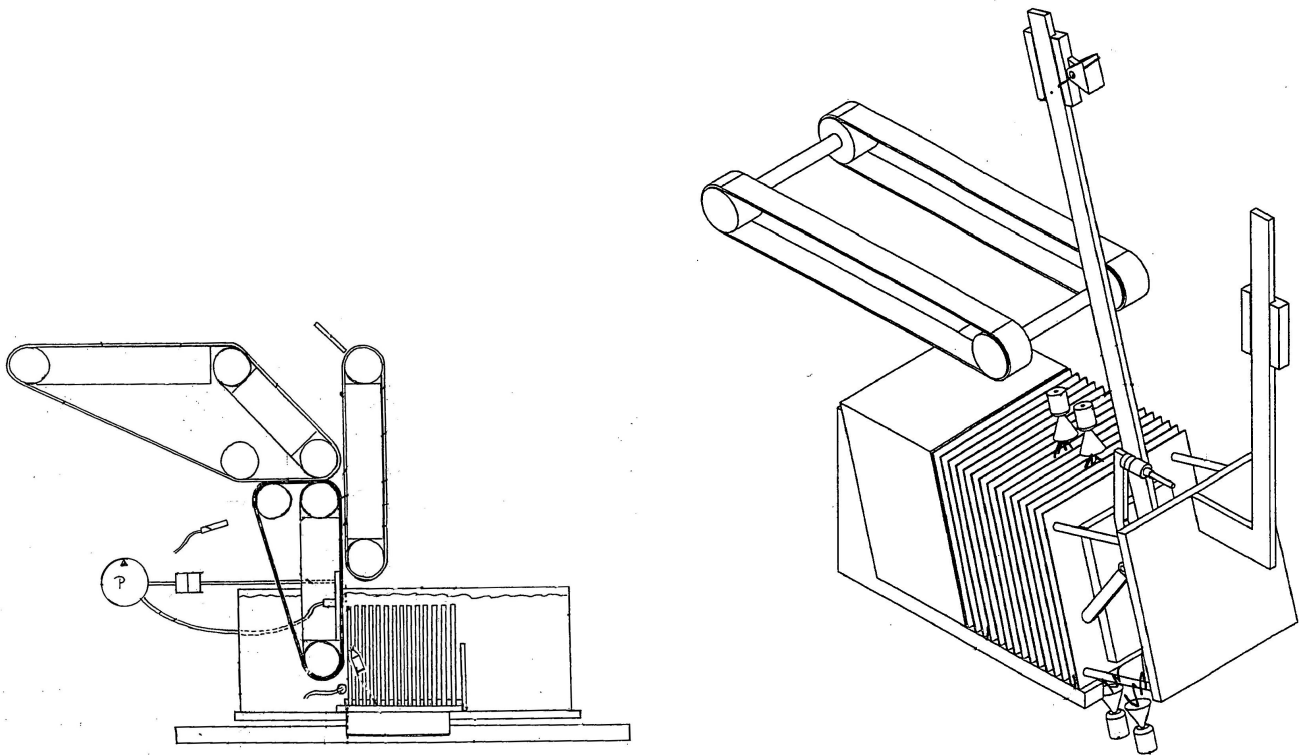


Abbildung 2.12: Darstellung des Patentes DE 102006011870 (aus Renn [2006]) (links) und des Patentes EP 1935599 (aus Herter [2006]) (rechts)

Aus dem Jahre 2008 stammt das letzte betrachtete Patent mit der Nummer **EP 1935599** (siehe Herter [2006]). Auch dieses Patent arbeitet mit einem vom Werkstückträger gelösten gesägten Block. Dieser wird vertikal in den Vereinzelungsapparat eingeführt. Die Erfindung sieht vor, dass ca. fünf bis zehn Substrate von einem Flüssigkeitsstrom angestrahlt werden. Dadurch soll sich ein Flüssigkeitsvolumen zwischen diesen Wafern ausbilden, welches als Dämpfungselement beim anschließenden Greifen wirken soll. Der Greifer wird parallel zum ersten Wafer eingeführt. Dabei übertragen entsprechende Bohrungen am Greifer den Unterdruck, welcher beispielsweise von einer Pumpe erzeugt wird, auf den Wafer. Dadurch soll eine ausreichend große Haltekraft erzeugt werden, um den Wafer mittels des Greifers abzunehmen. Der vertikale Waferstapel soll bevorzugt leicht geneigt sein. Die Position des Wafers wird durch eine Vorrichtung mit vier Andruckstiften ermittelt. Zwischen diesen vier Stiften wird der Greifer dann eingeführt. Der vereinzelte Wafer soll auf ein über dem Waferstapel befindliches Förderband abgelegt werden. Die Vorrichtung ist in Abbildung 2.12 zu sehen.

### 2.4.2 Weitere Literatur

Neben Patenten und den eingangs beschriebenen Veröffentlichungen existieren noch eine geringe Anzahl an Publikationen zur Wafervereinzelung und weitere Publikationen zur Vereinzelung von flächigen Bauteilen aller Art. Dechant-Wagner [2008] beschreibt allgemein die Anforderungen der Photovoltaikindustrie und geht auch auf eine technische Lösung in Form einer Anlage (WaSep) der Firma RENA ein. Die verwendeten Abbildungen und die textuelle Beschreibung lassen eine Umsetzung des Patent DE 102005016519 vermuten. Genauere Angaben bezüglich des Verfahrens fehlen jedoch. Weiterführend wird das Patent in der Umsetzung auch in Bürger u. a. [2005a] beschrieben. Die Anlage soll dabei auch für Wafer mit einer Kantenlänge von 210 mm ausgelegt sein. Das Ablösen der Wafer vom Werkstückträger wird in warmem Wasser oder in einer geeigneten chemischen Lösung durchgeführt. Die gelösten Wafer werden in einem Korb gesammelt. Anschließend wird die Separierung mithilfe des Mitnehmers beschrieben. In der beschriebenen Ausführung ist der Mitnehmer mit einer Rolle oder einem flexiblen Kunststoffknauf ausgestattet. Die Leistungsdaten der Separierung werden mit 1000 Wafern pro Stunde angegeben bei einer Bruchrate von unter 1%.

Reddig u. a. [2006] beschreibt die Umsetzung des Patent WO 2006/125559. In dieser Publikation wird das Wirkprinzip erklärt und die Umsetzung in eine industrietaugliche Anlage beschrieben. Andere Publikationen beschreiben Verfahren für feste, flächige Substrate (beispielsweise Holz- oder Stahlplatten), flexible Werkstücke (beispielsweise Papierprodukte) oder biegeschlaffe Werkstücke (beispielsweise Textilstoffe). Hesse [2006] beschreibt in allgemeiner Form die Vereinzelung von flachen Bauteilen. Dabei wird beim Prinzip der Vereinzelung zwischen *Translation* und *Rotation* unterschieden. Das translatorische Prinzip zeichnet sich durch Mitnehmer aus, die umlaufend oder oszillierend die Flachteile von einem Stapel vereinzeln. Unter dem rotatorischen Prinzip subsumieren sich im Vergleich dazu das Vereinzeln des Flachteils mittels Rollen, rotatorischer Bewegungen von Greifern oder auch das Vereinzeln durch mechanische Trennung der Flachteile mittels rotierender Scheiben. Zur Vereinzelung von Flachteilen werden dazu zusätzlich Beispiele angegeben, welche die Prinzipien der rollenbasierten Patente widerspiegeln. Ergänzend wird auch der Einsatz von Bürstenwalzen zur Vorvereinzelung und Förderung eines Stapels Flachteile diskutiert.



### 2.4.3 Zusammenfassung und Folgerung aus dem Stand der Technik

Die rollenbasierte Vereinzelung hat eine lange Historie und wird sowohl in Patentschriften als auch in der Literatur zur Separierung von Flachteilen beschrieben. Auch für Wafer wird dieses Prinzip angewandt, jedoch sind bei der Anwendung folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Das Zusammenspiel aus Anpressdruck und rotierenden Walzen induziert mechanischen Stress auf den Wafer
- Durch die rotierenden Walzen oder Rollen entsteht die Gefahr des Abriebs auf dem Wafer
- Durch den Einsatz eines Schlitzes dürfen die Wafer in der Dicke nicht stark variieren. Bei dünneren Wafern nimmt die Variation der Dicke jedoch weiter zu, da der Sägedraht (und damit die Schnittbreite) nicht beliebig reduziert werden können.

Weitere Erfindungen sind primär für den Einsatz bei Halbleiterwafern gedacht (Miyazaki u. a. [1996]). Durch die Dickenunterschiede zwischen Halbleiterwafern und Photovoltaikwafern sind die Prinzipien jedoch nicht direkt übertragbar. Die mechanische Stabilität der Halbleiterwafer erlaubt eine andere Umgangsweise, jedoch würden gelöste Wafer und das ungeführte Herunterfallen Wafer beschädigen oder in eine undefinierte Lage bringen (siehe Hauser [1997]).

Die direkte Vereinzelung vom horizontalen Werkstückträger wird in zwei Patenten beschrieben (Gentscher [2000] und Güthenke u. a. [2002]). Dabei besteht jedoch die Problematik des Umgangs mit bereits gelösten Wafern (siehe auch Abschnitt 3.3), was in den Patenten nicht näher erläutert wird. Weiterhin muss auch der mechanische Stress beim Abknicken der Wafer beachtet werden. Die Vereinzelung direkt vom Werkstückträger beschreibt auch Günter [1999]. Jedoch ist hier der Werkstückträger vertikal angeordnet und die Wafer werden durch ein Schneidwerkzeug gelöst. Auch hier ist der Umgang mit bereits gelösten Wafern nicht näher erläutert. Das ungeführte Gleiten der Wafer in eine Kassette ist ebenfalls in der Umsetzung als kritisch anzusehen.

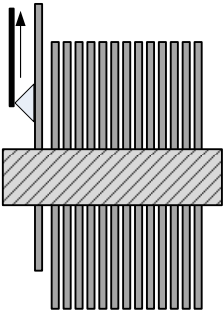
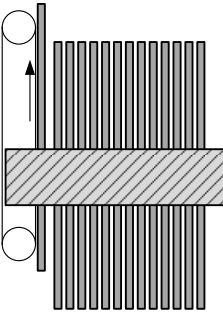
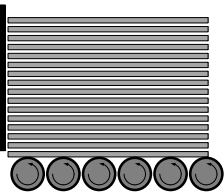
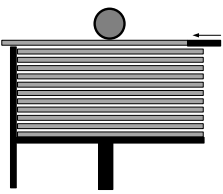
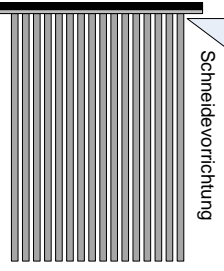
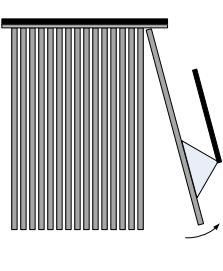
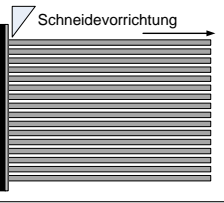
Die Vereinzelung von gelösten Wafern ist Bestandteil von vier Patenten (Bürger u. a. [2005b], Coenen und Coenen [2006], Renn [2006] und Herter [2006]). Dabei werden die gelösten Wafer dem Vereinzelungsmechanismus in vertikaler Ausrichtung präsentiert. Coenen und Coenen [2006] beschreiben auch die horizontale Zuführung. Problematisch wird in diesem Patent die Rückhaltevorrichtung angesehen, welche sehr genau positioniert werden muss, um eine zuverlässige Vereinzelung eines Wafers zu erreichen.

Die Erkennung des Waferspalt zwischen den Wafern ist jedoch sensortechnisch komplex, da der Spalt sehr schmal ist und die Fertigungsumgebung mit flüssigen Rückständen belastet ist. Auch die Waferposition am Greifer kann sich verändern, falls die Adhäsionskräfte des Greifers nicht vollständig ausgebildet sind. Das Erkennen von Waferbruch oder unvollständigen Wafern mittels Auswertung von Bilddaten ist aufwendig und vergleichsweise zeitintensiv.

Bei der vertikalen Zuführung eines Waferstapels ist die Gefahr von mechanischem Stress auf die Kanten erhöht, da eine Unterstützung der Wafer an der unteren Kante erforderlich ist. Vorteil der vertikalen Zuführung ist jedoch eine höhere Anzahl von Wafern im Stapel im Vergleich zur horizontalen Zuführung. Bei der horizontalen Zuführung ist die Stapelhöhe begrenzt, da der untere Wafer die Gewichtskraft des Stapels tragen muss und dahingehend auch mechanischem Stress ausgesetzt ist.

Eine generelle Entwicklungsrichtung der Patente und veröffentlichten Applikationen ist nicht erkennbar. Auffällig ist jedoch die Entscheidung in den zeitlich letzten vier Patenten, die Wafer vollständig vom Werkstückträger abzulösen. Auf die Unterschiede der Zuführung wird im nachfolgenden Kapitel näher eingegangen.

Tabelle 2.3: Übersicht und Strukturierung der Vereinzelungsalternativen

|                    |            |   |  |
|--------------------|------------|---|--|
| Vom Stapel         | Vertikal   |    |    |
|                    |            | aus Haltevorrichtung, mit Greifer   | aus Haltevorrichtung, mit Gurtförderer   |
|                    | Horizontal |   |   |
|                    |            | Rollenbasiert   | mit Schiebevorrichtung   |
| Am Werkstückträger | Vertikal   |  |  |
|                    |            | hängend, mit Schneidevorrichtung  | hängend oder stehend, mit Greifer  |
|                    | Horizontal |  |  |
|                    |            | mit Schneidevorrichtung   |  |

## **3 Analyse der Randbedingungen und Ableitung von Anforderungen an das Verfahren**

Die VDI-Richtlinie 2680 definiert die Handhabung von Werkstücken mittels Teilfunktionen, bestehend aus Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren (siehe VDI [1990]). Innerhalb dieser Teilfunktionen ist die Vereinzelung der Wafer grundsätzlich eine Aufgabe, um Mengen zu verändern. Vereinzeln in der Produktion kann dabei als Zu- oder Abteilen einer bestimmten Anzahl Werkstücke aufgefasst werden (Vergleiche auch Hesse [2006]). Die Funktion des Vereinzelns kann beispielsweise wie in Abbildung 3.1 charakterisiert werden. Dort sind die wichtigsten Parameter aus logistischer Sicht angegeben.

Gemäß der Richtlinie VDI-2680 finden sich auch die andern Teilfunktionen in der Wafervereinzelung wieder:

- Speichern: Geordnete Zuführung der Wafer zum Vereinzelungsprozess
- Mengen verändern: Vereinzelung zu einzelnen Wafern
- Bewegen: Abtransport der Wafer
- Sichern: Schaffung und Erhaltung einer definierten Lage der Wafer für die folgenden Prozessschritte
- Kontrollieren: Prüfung der Eigenschaften des Wafers als auch dessen Position

Im Folgenden werden die einzelnen Funktionsteile in einer zusammengefassten Form (Speicher und Zuführung, Vereinzelungsablauf und Abtransport) eingehender analysiert.

### **3.1 Zuführung der Wafer zum Vereinzelungsmechanismus**

Ausgehend vom Stand der Technik ist eine grundlegende Analyse der Zuführung der Wafer zur Vereinzelung erforderlich. Zwei verschiedene Ansätze existieren:

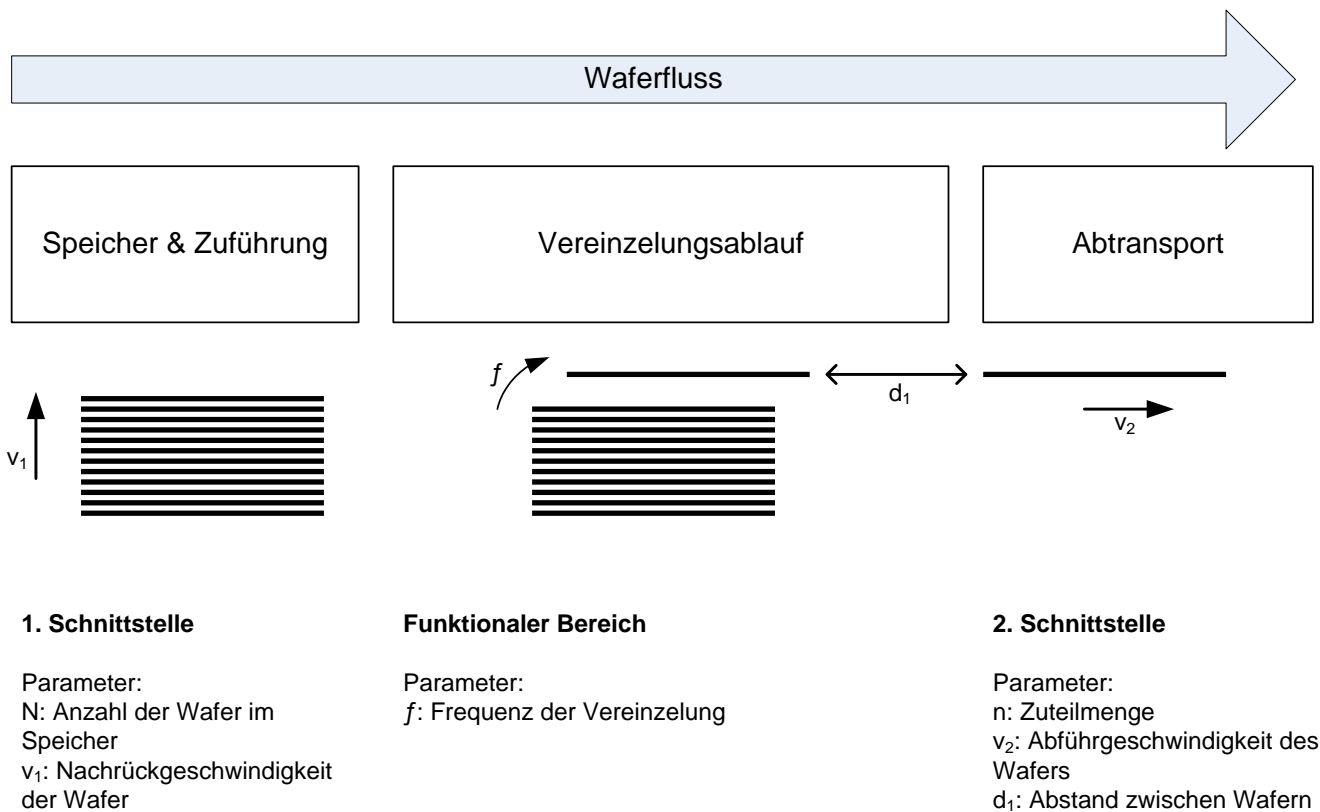


Abbildung 3.1: Funktionsbild zur Vereinzelung

- Vereinzelung direkt vom Werkstückträger
- Vereinzelung nach vollständiger Ablösung der Wafer vom Werkstückträger

Die **Vereinzelung vom Werkstückträger** ist naheliegend, da diese direkt im Anschluss an die Vorreinigung erfolgen kann, ohne den Wafer einem weiteren Handhabungsschritt zu unterziehen. Im Gegensatz dazu müssen bei der **Vereinzelung nach vollständiger Ablösung der Wafer vom Werkstückträger** alle Wafer vollständig gelöst werden und in geeigneter Weise gesammelt und weiter transportiert werden. Zur Bewertung der Konzepte wurden Untersuchungen durchgeführt, welche die Bestimmung der Haltekräfte der Klebnaht zwischen Wafer und Glasplatte in einer typischen Produktionsumgebung zum Ziel haben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung (siehe auch Reddig und Grimme [2006]) werden nun im Folgenden beschrieben.

### 3.2 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Haltekräfte der Klebnaht

Prozesstechnisch soll eine Antrocknung der Wafer nach dem Sägen vermieden werden, da dadurch schwer abzureinigende Rückstände des Slurrys auf dem Wafer verbleiben und die Wafer stärker aneinander haften. Deshalb werden die gesägten Ingots entweder sofort nach dem Sägen in die Vorreinigung eingeschleust oder geeignet zwischengelagert. Diese Zwischenlagerung kann in Becken erfolgen, wie sie in Abbildung 3.2 dargestellt ist.

Dort werden die Werkstückträger aufgeständert oder fixiert, so dass die Wafer nicht mit dem Becken in Berührung kommen. Als Medium für die Lagerung können verschiedene Lösungen eingesetzt werden, welche sowohl eine Reinigungswirkung auf das verwendete Slurrygemisch als auch eine destabilisierende Wirkung auf den Kleber haben können.



Abbildung 3.2: Transportbecken zur Zwischenlagerung von gesägten Ingots

In der vorliegenden Untersuchung wurde Dipropylenglykolmonomethylether (DPM) verwendet, welcher neben der Reinigungswirkung auch eine zersetzende Wirkung auf viele Kunststoffe ausübt. Diese zersetzende Wirkung ist in der Produktion vielfach gewollt, um die Klebnaht für die weitere Vereinzelnung zu schwächen. Ziel der Untersuchung war die Analyse von Einflüssen auf die Haltekraft der Klebnaht, indem gezielt folgende Einflussparameter variiert wurden:

- Oberfläche des Ingots und der Glasplatte
- Klebertyp
- Verweildauer des gesägten Ingots im Bad

Zur Realisierung der Variationen der Glasplatten wurde in einigen Versuchen die Oberfläche mittels Sandstrahlen aufgeraut. Weiterhin wurden drei Klebertypen (Araldit 2011, Loctite AD 1339-A und Loctite AD 1238-A) verwendet und deren Aushärtezeit variiert. Bei allen Klebern handelt es sich um Zweikomponentenklebstoff auf Epoxidharzbasis, welcher mit einem Mischrohr kurz vor dem Auftrag gemischt wird. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde in der Waferfertigung standardmäßig mit dem Kleber Araldit 2011 gearbeitet. Der letzte variierte Parameter ist die Einlagerungszeit im DPM-Bad. Die Haltekraft der Wafer wurden mittels eines Versuchsstandes ermittelt, welcher in Abbildung 3.3 abgebildet ist.

Für diesen Versuchsstand wurde eine Lanze konstruiert, welche den Wafer flächig mittels Vakuum ansaugt. Die Vakuumlanze besteht aus einem 3 mm dicken Blech, auf das eine 1 mm dicke perforierte Auflage aus Silikon geklebt ist. Auf der quadratischen Grundfläche der Lanze befindet sich eine Lochmatrix. Durch Kanäle im Blech kann mithilfe vorbeiströmender Druckluft ein Vakuum aufgebaut werden, um den Wafer zu fixieren.

Die Lanze wird im Versuchsstand durch einen Zylinder in vertikaler Richtung bewegt. Die Kraft, die der Zylinder auf die Lanze in vertikaler Richtung ausübt, wird mittels eines Kraftsensors aufgenommen und der Kraftverlauf über eine Schnittstelle aufgezeichnet. Der gesägte Ingot wurde dazu so fixiert, dass die Vakuumlanze plan auf dem vordersten Wafer aufliegt. Um die Haftkräfte zwischen den Wafern zu unterdrücken, wurde jeweils ein Blatt Papier zwischen vorderstem und nachfolgendem Wafer eingeführt.

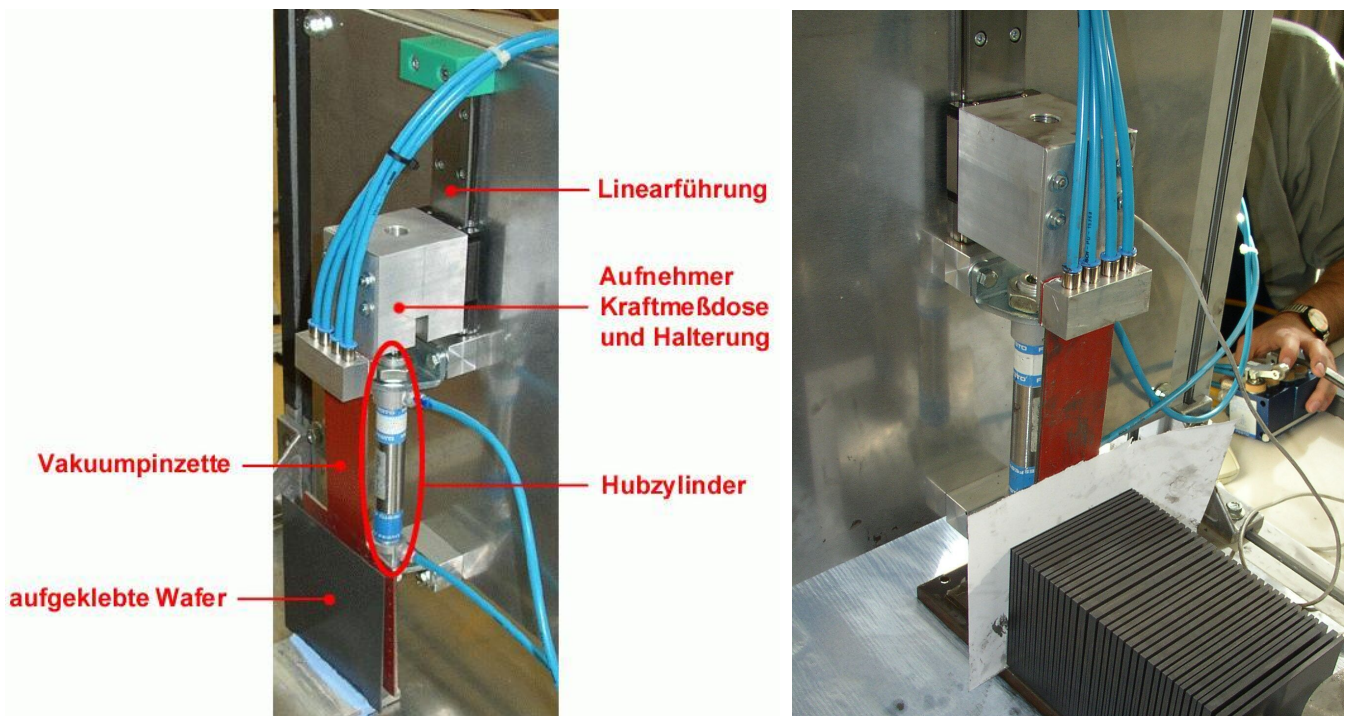


Abbildung 3.3: Details und Einsatz des Versuchsstandes

### 3.3 Analyse der Haltekräfte

In den Experimenten wurden insgesamt 9 Blöcke in 16 Versuchen verwendet, wobei einige Blöcke mehrfach im DPM-Bad eingelagert wurden, um dessen Einfluss zu untersuchen. Die Experimente wurden in einer realen Fertigungsumgebung durchgeführt. Geplant waren ursprünglich 20 Experimente, jedoch hatten sich bei 2 Versuchen in der Einlagerung schon alle Wafer vom Werkstückträger gelöst. Bei den Experimenten wurden jeweils 20-60 Wafer vom Werkstückträger gelöst.

Die durchgeführten Experimente und die wichtigsten Ergebnisparameter sind in Tabelle 3.1 abgebildet mit den folgenden Abkürzungen:

- $T_A$ : Aushärtezeit des Klebers
- $T_E$ : Einlagerungszeit im DPM-Bad
- $\omega$ : Ziehwinkel beim Ablösen
- $F_{MW}$ : Mittelwert der Haltekraft
- $F_{StAb}$ : Standardabweichung der Haltekraft



- $N_w$ : Anzahl Wafer im Experiment
- $N_l$ : Anzahl loser Wafer im Experiment

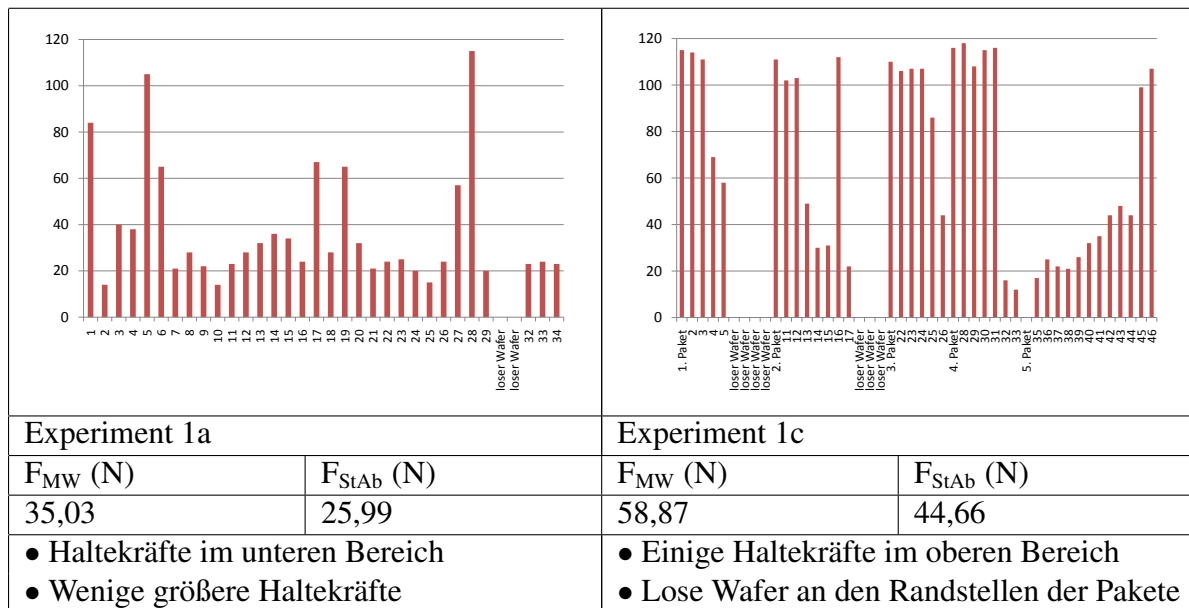
Tabelle 3.1: Experimenteplan der Ziehversuche

| Exp | Glasplatte    | Klebertyp      | $T_A$ (h) | $T_E$ (h) | Vorr. | $\omega$ | $F_{MW}$ (N) | $F_{StAb}$ (N) | $N_w$ | $N_l$ |
|-----|---------------|----------------|-----------|-----------|-------|----------|--------------|----------------|-------|-------|
| 1a  | geschliffen   | Araldit 2011   | 36        | 0         | nein  | 0°       | 35,03        | 25,99          | 34    | 2     |
| 1b  | geschliffen   | Araldit 2011   | 36        | 3         | nein  | 0°       | 54,07        | 35,25          | 59    | 4     |
| 1c  | geschliffen   | Araldit 2011   | 36        | 22        | nein  | 0°       | 58,87        | 44,66          | 46    | 7     |
| 2a  | ungeschliffen | Araldit 2011   | 36        | 0         | nein  | 0°       | 53,68        | 26,87          | 38    | 1     |
| 2b  | ungeschliffen | Araldit 2011   | 36        | 22        | nein  | 0°       | 42,11        | 38,60          | 62    | 4     |
| 3a  | geschliffen   | Loctite 1339-A | 36        | 1,5       | nein  | 0°       | 53,15        | 29,64          | 55    | 4     |
| 3b  | geschliffen   | Loctite 1339-A | 36        | 2,5       | nein  | 0°       | 70,44        | 26,46          | 39    | 0     |
| 4   | geschliffen   | Loctite 1238-A | 36        | 3         | nein  | 0°       | 42,36        | 31,73          | 42    | 2     |
| 5a  | ungeschliffen | Loctite 1339-A | 36        | 0,5       | ja    | 0°       | 35,67        | 19,26          | 33    | 3     |
| 5b  | ungeschliffen | Loctite 1339-A | 36        | 16        | ja    | 0°       | 60,16        | 28,00          | 37    | 0     |
| 6   | ungeschliffen | Loctite 1238-A | 36        | 3         | ja    | 0°       | 61,27        | 29,95          | 37    | 3     |
| 7a  | geschliffen   | Araldit 2011   | 22        | 24        | nein  | 0°       | 148,67       | 1,89           | 3     | 0     |
| 7b  | geschliffen   | Araldit 2011   | 22        | 24        | nein  | 10°      | 10,77        | 4,84           | 20    | 0     |
| 8a  | geschliffen   | Araldit 2011   | 160       | 0,5       | ja    | 10°      | 16,42        | 5,83           | 32    | 0     |
| 8b  | geschliffen   | Araldit 2011   | 160       | 1,5       | ja    | 10°      | 19,12        | 5,85           | 47    | 0     |
| 9   | geschliffen   | Araldit 2011   | 160       | 1         | nein  | 10°      | 10,98        | 4,16           | 20    | 2     |

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass keine signifikante Korrelation zwischen den Parametern hergestellt werden kann. In der Diskussionsdiskussion der Ergebnisse werden die Auffälligkeiten beschrieben.

In den Experimenten 1a-1c nimmt die mittlere Haltekraft der Wafer mit der Dauer der Einlagerung im DPM-Bad zu, wobei jedoch die Variabilität, ausgedrückt durch die Standardabweichung, ebenfalls zunimmt. Die mittlere Haltekraft wird jedoch durch die vollständige Loslösung einiger Wafer in Experiment 1c stark beeinflusst. Die Zunahme der Haltekräfte entspricht nicht den Erwartungen, da durch die Lagerung im DPM der Kleber Zersetzungserscheinungen aufweisen sollte (Gentischer [2006]). Auffällig ist jedoch die Zunahme der Variabilität, die in Tabelle 3.2 gegenübergestellt ist. Auffällig bei Experiment 3a und 3b ist die Loslösung einzelner Wafer an den Enden der jeweiligen Pakete. Dies kann zum einen aus einer besseren Wirksamkeit des DPM an diesen Stellen liegen, da die Durchmischungsrate der Lösung dort erhöht ist. Zum anderen können auch mechanische Ursachen zum Tragen kommen, hervorgerufen durch die Handhabung des Ingots oder auch das leichte Abknicken an der Klebenahrt bei der Paketbildung.

Tabelle 3.2: Haltekräfte der Experimente 1a und 1c (Abszisse: Wafernummer, Ordinate: Haltekraft (N))



In den Experimenten 2a und 2b mit ähnlichen Parametern nimmt die mittlere Haltekraft jedoch ab, wobei ebenfalls die Variabilität der Haltekräfte zunimmt. In den Experimenten 2a und 2b wurden geschliffene Glasplatten verwendet. Ein Einfluss auf die Haltekräfte kann jedoch nicht abgeleitet werden. Die Zunahme der Variabilität in den Experimenten 1a-2b deutet jedoch auf einen gewissen Einfluss der Einlagerungszeit auf die Haltekräfte der Klebnaht. Dies ist auch in Tabelle 3.3 zu sehen, wo in Experiment 2b deutlich mehr gelöste Scheiben und abnehmende Haltekräfte auftreten.

Der Wechsel auf die alternativen Klebstoffe Loctite AD 1339-A und Loctite AD 1238-A in den Experimenten 3 und 4 führt weder zu einer Änderung der mittleren Haltekräfte, noch zu einer Änderung in der Variabilität. Die Verteilung der Haltekräfte ist mit denen der Experimente 1 und 2 vergleichbar. In den Experimenten 5 bis 6 soll der Einfluss der Vorreinigung eingeschätzt werden. Möglich wäre eine Verringerung der Haltekräfte aufgrund der chemischen und mechanischen Einwirkungen in der Vorreinigung, welche den gesägten Block durch strömende Medien reinigt. Dies ist jedoch in diesen Experimenten nicht erkennbar.

Eine Besonderheit stellt das Experiment 7a dar. Dort sind die Haltekräfte trotz einer Einlagerungszeit im DPM-Bad von 24 Stunden ungewöhnlich stark, so dass nach der Ablösung von 3 Wafern das Experiment abgebrochen werden musste, da die Vakuumlanze nicht die benötigte Haftkraft auf den Wafer aufbringen konnte. Die bis dahin ermittelten Haltekräfte liegen im Bereich von nahezu 150 Newton.

Tabelle 3.3: Haltekräfte der Experimente 8b und 9 (Abszisse: Wafernummer, Ordinate: Haltekraft (N))

|  |                |   |                |
|--|----------------|---|----------------|
|  |                |   |                |
| Experiment 2a  |                | Experiment 2b   |                |
| $F_{MW}$ (N)   | $F_{StAb}$ (N) | $F_{MW}$ (N)  | $F_{StAb}$ (N) |
| 53,68  | 26,87          | 42,11   | 38,60          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Haltekräfte vergleichsweise homogen verteilt</li> <li>• Wenige größere Haltekräfte</li> </ul> |                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einige lose Wafer und verminderte Haltekräfte an den Randstellen der Pakete</li> </ul> |                |

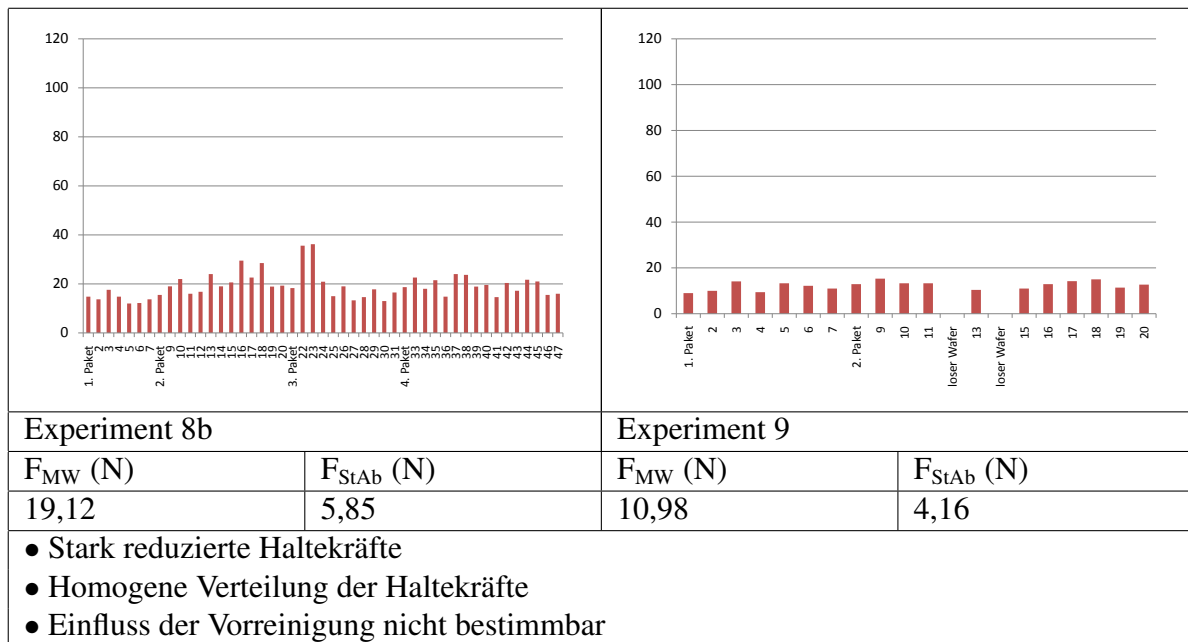
Die Erfahrungen der Experimente 1 bis 7a führen zu der Überlegung, die Haltekräfte des Klebers vor der Loslösung mechanisch zu schwächen. Dazu wird in den Experimenten 7b bis 9 die Vakuumlanze um  $10^\circ$  angewinkelt. Die Wafer wurden nun um diese  $10^\circ$  an der Klebnaht abgeknickt und an die Vakuumlanze geführt. Dadurch ergab sich bei allen vier Experimenten eine deutliche Verringerung der Haltekräfte. Durch das Abknicken, wie es auch bei der manuellen Vereinzelung angewandt wird, ist die Klebnaht geschwächt, so dass sich die Wafer leichter lösen lassen. Dies ist exemplarisch in Tabelle 3.4 dargestellt. Auffällig sind die stark reduzierten Haftkräfte und deren homogenere Verteilung. Ein zusätzlich lösender Einfluss der Vorreinigung ist in diesen Experimenten wiederum nicht erkennbar.

### 3.3.1 Interpretation der Ergebnisse der Ziehversuche

Es hat sich gezeigt, dass in einer Fertigungsumgebung die Haltekräfte der Wafer am Werkstückträger stark variieren können. Der Grund dafür liegt in der Vielzahl der Faktoren, welche den Prozess des Wafersägens beeinflussen können. Diese Einflussfaktoren sind im Einzelnen:

- Zustand der Oberflächen von Ingots und Glasplatten
- Durchmischung, Alter und Temperatur des Klebers
- Auftragsgeometrie und Schichtdicke des Klebers

Tabelle 3.4: Haltekräfte der Experimente 2a und 2b (Abszisse: Wafernummer, Ordinate: Haltekraft (N))



- Aushärtung des Klebers und Beeinflussung durch die Umgebungsverhältnisse wie beispielsweise Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Schnitttiefe
- Mechanische Behandlung des gesägten Ingots bei Entnahme aus der Säge
- Lagerungszeit, Alter und Beschaffenheit der verwendeten Medien
- Art der Vorreinigung

In einer Fertigungsumgebung sind diese Parameter nicht mit vertretbarem Aufwand zu kontrollieren und in definierten Toleranzbereichen zu halten. Daher muss davon ausgegangen werden, dass eine automatische Vereinzelung gesägte Ingots mit unterschiedlichen Eigenschaften verarbeiten können muss.

### 3.3.2 Schlußfolgerung

Die Vereinzelung direkt vom Werkstückträger ist aus diesen Gründen nicht der präferierte Ansatz. Zur Reduktion der Haltekräfte des Klebers werden die Wafer in manchen Vorschlägen aus Abschnitt 2.4 mechanisch an der Klebnaht abgeknickt. Dies induziert jedoch mechanischen Stress im unteren Segment des Wafers an der Klebnaht. Weiterhin ist der Umgang mit bereits gelösten Wafern aufwändig, da diese in

ihrer Lage gegenüber den anderen verschoben sein können (vergleiche auch Reddig und Grimme [2006]). Die vollständige Ablösung vom Werkstückträger ist daher zu bevorzugen. Dies ist auch in den neueren Patenten die bevorzugte Art der Präsentation der Wafer. Bei der horizontalen Vereinzelnung werden die Wafer in einem oder mehreren Stapeln zusammengefasst. Die damit verbundenen erhöhten Adhäsionskräfte werden im nachfolgenden Abschnitt 3.4 diskutiert.

#### 3.4 Haftung der Wafer im Stapel

Ähnlich wie andere flächige Substrate haften Wafer im Stapel in der Regel aneinander. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird dies als Adhäsion bezeichnet, wobei Adhäsion ein Sammelbegriff für die Beschreibung verschiedener Haftungsphänomene darstellt (Bischof und Possart [1983]). Für die Vereinzelnung nach dem Sägen sind Kräfte zwischen feuchten Wafern von besonderem Interesse, jedoch wird dem besseren Verständnis und der Vollständigkeit halber auch kurz auf die Haftkräfte trockener Wafer eingegangen.

Im Allgemeinen kann Adhäsion in Bezug auf zwei Oberflächen dadurch definiert werden, dass diese durch Valenzkräfte oder durch mechanische Verankerung zusammengehalten werden. In vielen Fällen wirken beide Kräfte gleichzeitig (vergleiche auch Good [1976]).

In Bezug auf Siliziumwafer wirken ebenfalls beide Kräfte, da sowohl eine mechanische Verankerung der Wafer auf Mikroebene stattfinden kann als auch eine Haftung aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Atomen, insbesondere elektrostatischen Kräften und Van-der-Waals-Kräften. Die Verankerung der Wafer auf Mikroebene findet aufgrund der Unebenheiten der Waferoberfläche statt (siehe auch Popov [2009]). Anspach und Lawrenz [2009] zeigen, dass die Variabilität der Dicke eines Wafers (englischer Fachausdruck: Total Thickness Variation (TTV)) bei derzeitigen Wafern typischerweise zwischen 10-20% der Waferdicke liegt, was bei einem Wafer von 180  $\mu\text{m}$  oft zu Dickenunterschieden von 20-30  $\mu\text{m}$  führt. Lawrenz u. a. [2006] haben die Quantifizierung der Sägeriefen als Ziel ihrer Untersuchung. Sie zeigen, dass typische Sägeriefen 100 - 200  $\mu\text{m}$  breit sind, bei einer Tiefe von 10 bis 50  $\mu\text{m}$ . Um die Haftkraft der Wafer untereinander zu illustrieren, werden drei Fälle unterschieden:

- Trockene Wafer
- Feuchte Wafer mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm
- Feuchte Wafer mit einem Flüssigkeitsfilm von  $>100 \mu\text{m}$

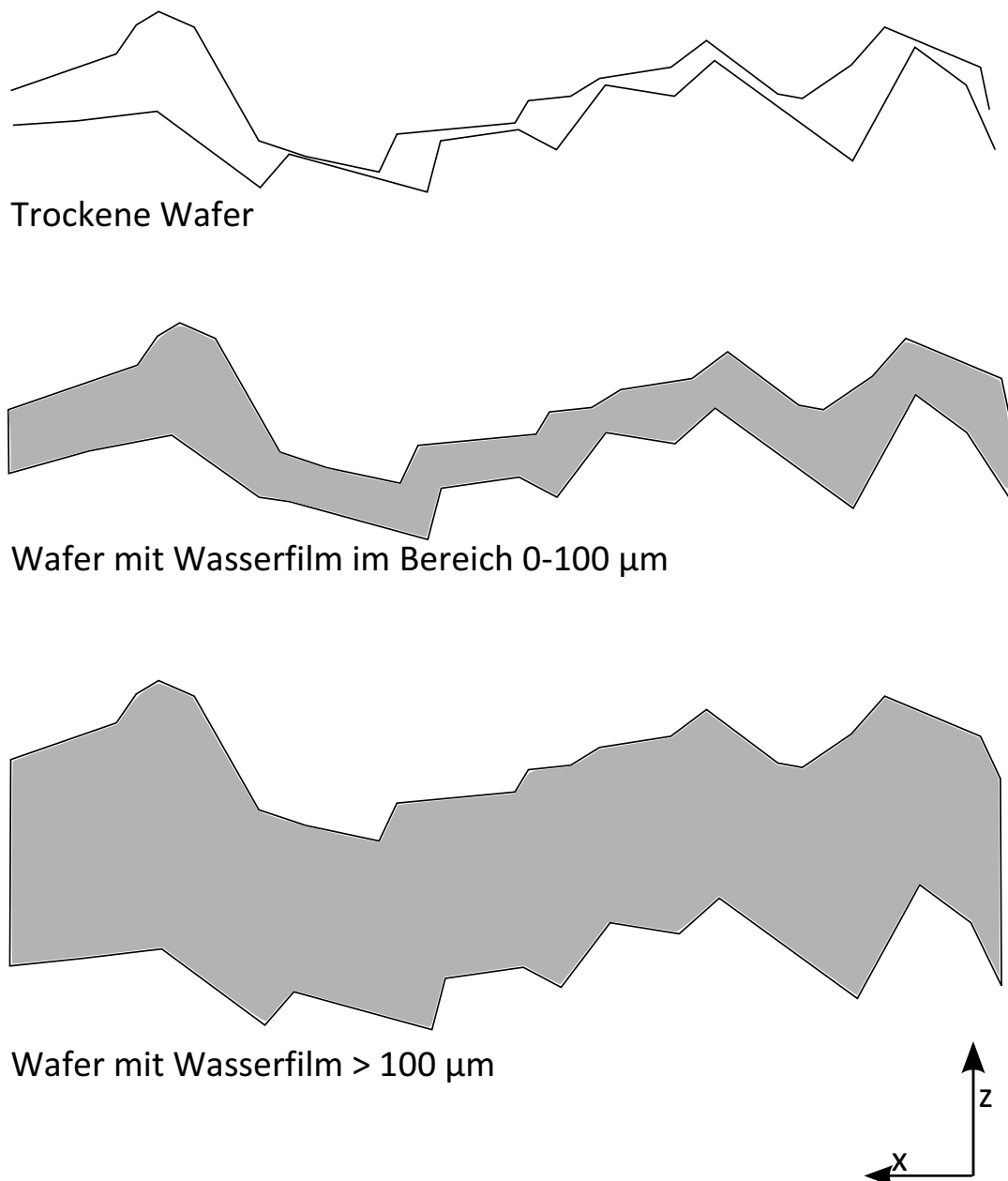


Abbildung 3.4: Prinzipielle kleinskalige Darstellung von Abständen zwischen Wafern im Mikrobereich

Diese Fälle sind in auch in Abbildung 3.4 dargestellt.

Die Wafer unterliegen im trockenen Zustand sowohl der mechanischen Adhäsion als auch der intermolekularen Wechselwirkung an Stellen, die sich berühren oder einen hinreichend kleinen Abstand voneinander haben. Sobald der Flüssigkeitsfilm vollständig den Zwischenraum der Wafer benetzt, sind andere Phänomene für den größeren Teil der Adhäsionskräfte verantwortlich. Die intermolekularen Anziehungskräfte nehmen in der dritten Potenz mit dem Abstand ab. In z-Richtung (Abbildung 3.4) ist der äußere

re Luftdruck für die Haftung zum größten Teil verantwortlich. Die Oberflächenspannung des Wassers verhindert einen schnellen Eintritt von Luft in x-Richtung zwischen den Wafern, wenn auf diese entgegengesetzte Kräfte in z-Richtung wirken. Bei Körpern mit hinreichend glatter Oberfläche würden jedoch mit geringem Kraftaufwand in z-Richtung Verschiebungen möglich sein. Im Fall der Wafer erschweren die mechanischen Verankerungen jedoch die Verschiebung, sofern der Abstand der Wafer kleiner ist als die Unebenheiten an der Waferoberfläche. Etwas geringer ist diese mechanische Verankerung bei einer Verschiebung in Richtung der Sägeriefen, da in dieser Richtung die Unebenheiten kleiner sind. Sobald der Abstand doppelt so groß wie diese Unebenheiten ist, ist auch eine Verschiebung in z-Richtung mit geringem Kraftaufwand möglich.

Für die Nasswafervereinzelung bedeutet dies, dass der Abstand zwischen den Wafern hinreichend groß sein muss, wenn eine Verschiebung in Richtung der z-Achse erforderlich ist. Dies ist besonders dann von Relevanz, wenn die Wafer vor der Vereinzelung vollständig vom Werkstückträger gelöst werden. Im Fall der Vereinzelung direkt vom Werkstückträger ist zumindest im unteren Bereich der Wafer (in der Umgebung der Klebnaht) ein Abstand von der Breite des Sägespaltes (im Bereich von 140-180  $\mu\text{m}$ ) vorhanden (vergleiche auch Schumann u. a. [2009a]).

### 3.5 Mechanische Stabilität der Wafer

Neben dem Prozessziel der Vereinzelung ist die mechanische Unversehrtheit der Wafer das wichtigste Qualitätsziel bei der Vereinzelung. Forschungsgegenstand ist dabei immer die Ursache und Ausbreitung von Rissen, die zum Totalverlust des Wafers führen können. Dabei ist der Begriff der „Vorschädigung“ von zentraler Bedeutung, besonders in der Produktion. Dies liegt an der Schwierigkeit, die Ursachen für den Bruch eines Wafers direkt einem spezifischen Prozessschritt zuzuordnen, da durch vorhergehende Prozessschritte bereits Vorschädigungen in den Wafer eingetragen werden könnten. Folgerichtig fokussieren viele Forschungsarbeiten auf die Charakterisierung von Vorschädigungen im Wafermaterial und die Analyse bzw. Vorhersage, welche Art von Vorschädigung zum Verlust eines Wafers führen kann.

Buonassisi u. a. [2007] stellen Verfahren vor, um Stress und Oberflächenschädigungen mittels Wärmeeintrag („Annealing“) oder auch Ätzen und Polieren zu vermindern. Wasmer u. a. [2008] gehen in ihrem Beitrag näher auf die Einflüsse des Sägens auf die Waferkanten ein. Sie stellen dar, dass eine Oberflächen-

behandlung der Blöcke die Waferschädigung an den Kanten reduzieren kann, welche besonders durch den Eintritt des Sägedrahts hervorgerufen wird. Schneider [2004] beschreibt in allgemeiner Form die Fehlertypen im Kristallaufbau von Siliziumwafern, was in Tabelle 3.5 zusammengefasst ist:

Tabelle 3.5: Kristallbaufehler im Siliziumwafer

| <b>Null-dimensional</b>  | <b>Ein-dimensional</b>                                       | <b>Zwei-dimensional</b>                                 | <b>Drei-dimensional</b>                            |
|--|--|---|--|
| <b>Punktdefekte</b> (bspw. Fremdatome, Schottky- und Frenkelfehlordnung) | <b>Liniendefekte</b> (bspw. Stufen- und Schraubenversetzung) | <b>Flächendefekte</b> (bspw. Stapelfehler, Korngrenzen) | <b>Volumendefekte</b> (bspw. Poren, Phasen, Risse) |

Rupnowski und Sopori [2009] gehen davon aus, dass die Bruchfestigkeit eines Wafer im Wesentlichen von der Waferoberfläche determiniert wird. Im Bezugssystem aus Tabelle 3.5 wären dies die drei-dimensionalen Defekte wie Risse oder Einkerbungen in der Waferoberfläche. Im Falle der multikristallinen Wafer dürfen jedoch nicht die Korngrenzen (zwei-dimensionale Defekte) vernachlässigt werden, deren Einfluss auf die Bruchfestigkeit der Wafer beispielsweise Sarau u. a. [2009] beschreiben. Risse in der Oberfläche entstehen durch den Einsatz des Abrasivmediums, welches nicht nur in Sägerichtung eine Kerbwirkung entfaltet, sondern auch an den Seiten, den späteren Waferoberflächen. Funke u. a. [2004] beschreiben die Mikrorisse, welche durch das Sägen an der Oberfläche der Wafer entstehen, und geben deren durchschnittliche Tiefe mit 5-50  $\mu\text{m}$  an.

Rupnowski und Sopori [2009] differenzieren den Wafer in drei Teile: das Volumen, die Oberflächen und die Kanten. Zu jedem dieser Teile stellen sie eine Verteilungsfunktion auf, welche die Wahrscheinlichkeit von Bruch berechnet und in einem Simulationsmodell verwendet wird. Unter der Voraussetzung, dass die Beschaffenheit der Waferoberfläche den wichtigsten Anteil an der Bruchfestigkeit der Wafer darstellt, werden die Untersuchungen darauf fokussiert. Weiterhin werden auch die Schmalseiten der Wafer nicht in die Betrachtungen mit einbezogen, da durch das in heutigen Fertigungen übliche Polieren der Ingots keine nennenswerten Schädigungen zu erwarten seien. Aufgrund unsicherer Datenlage wird auch die Waferkante nicht in das Modell mit einbezogen.

Für den zerstörenden Test der Bruchempfindlichkeit der Wafer werden verschiedene Verfahren verwendet. Bohne u. a. [2008] verwenden zwei Testmethoden, den „ball-on-ring“-Test und den „four-bar-bending“-Test. In Hinblick auf die Vereinzelnung ist der four-bar-bending-Test (siehe Abbildung 3.5) von besonderem Interesse. Hier zeigt sich bei multikristallinen Wafern eine Zunahme der Bruchempfindlichkeit, wenn der Wafer parallel zu den Sägeriefen belastet wird. Der Effekt zeigt sich auch bei monokristallinen Wafern, jedoch nicht mit ausreichender Signifikanz.



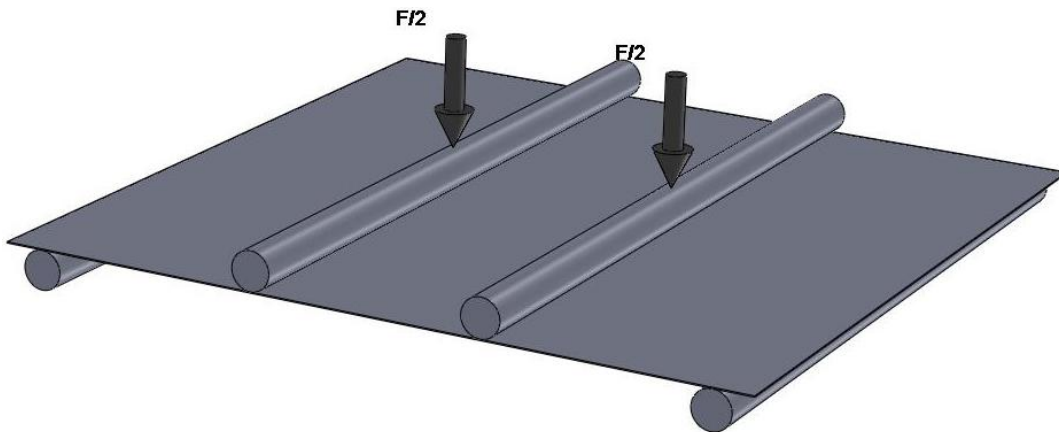


Abbildung 3.5: Four-bar-bending Test

Für die Vereinzelung bedeutet dies, dass die Ergebnisse der Bruchmechanik der Wafer mit einbezogen werden müssen und entsprechende Experimente und Prüfungen zur Qualitätssicherung hinzugezogen werden sollten. Weiterhin kann die Orientierung der Wafer bei der Vereinzelung aufgrund der Sägeriefen von Bedeutung sein.

#### 3.5.1 Kritik zur Literatur der Bruchmechanik von Siliziumwafern

Die derzeitigen Verfahren zur Bestimmung der Bruchfestigkeit sind für die Anwendung in der Produktion noch nicht vollständig. Während Rupnowski und Sopori [2009] die Kanten nicht berücksichtigen zeigen Wasmer u. a. [2008] dass die Kanten eine hohe Bedeutung für die Bruchfestigkeit haben. In den meisten Prüfverfahren wird der Four-Bar-Bending-Test oder der Ball-On-Ring-Test verwendet. Es zeigt sich, dass typische Wafer große statische Kräfte aufnehmen können, bevor es zum Bruch kommt. Die Praxis zeigt jedoch, dass weitaus geringere Kantenbelastung die Wafer mit geringeren Kräften zerstören können (siehe Abschnitt 5.5.3). Statische Tests eignen sich daher nur bedingt, um Schädigungspotential durch Prozessierung und Handhabung zu messen.

### 3.6 Vereinzelungsmechanismus

Der Vereinzelungsablauf wird aus logistischer Sicht von drei Parametern charakterisiert (siehe auch Hesse [2006] und VDI [1990]). Der Frequenz  $f$  der Vereinzelung (vereinzelte Wafer pro Zeiteinheit), dem Abstand  $d_1$  zwischen vereinzelt Wafern und der Abführgeschwindigkeit  $v_2$ . Gemäß der Aufgabenstel-

lung ist die Zuteilmenge bei der Vereinzelung  $n = 1$ . Weiterhin ist die Kantenlänge  $d_w$  des Wafers für die Abföhrgeschwindigkeit von Bedeutung. Die Parameter stehen in folgendem Zusammenhang:

$$v_2 = (d_w + d_1) * f \quad (3.1)$$

Im Falle der präferierten Zuföhrung der Wafer im Stapel muss weiterhin die Zuföhrgeschwindigkeit  $v_1$  des Stapels beröcksichtigt werden. Diese ergibt sich unter Beröcksichtigung der Dicke der Wafer  $d_2$  zu:

$$v_1 = d_2 * f \quad (3.2)$$

Darin enthalten sind nicht eine Aufstockung oder ein Wechsel des Stapels. In einer industriellen Version sind diese für die Erreichung eines bestimmten Durchsatzes einer Anlage mit einzubeziehen.

### 3.6.1 Rückstände des Klebers

Versuche in der Fertigung haben gezeigt, dass eine vollständige Entfernung von Kleberresten an der Waferkante nicht immer gewährleistet werden kann. Döpping [2006] beschreibt die Kleberreste an den Waferkanten nach der Loslösung vom Werkstückträger. Dies ist auch in Abbildung 3.6 deutlich zu sehen.

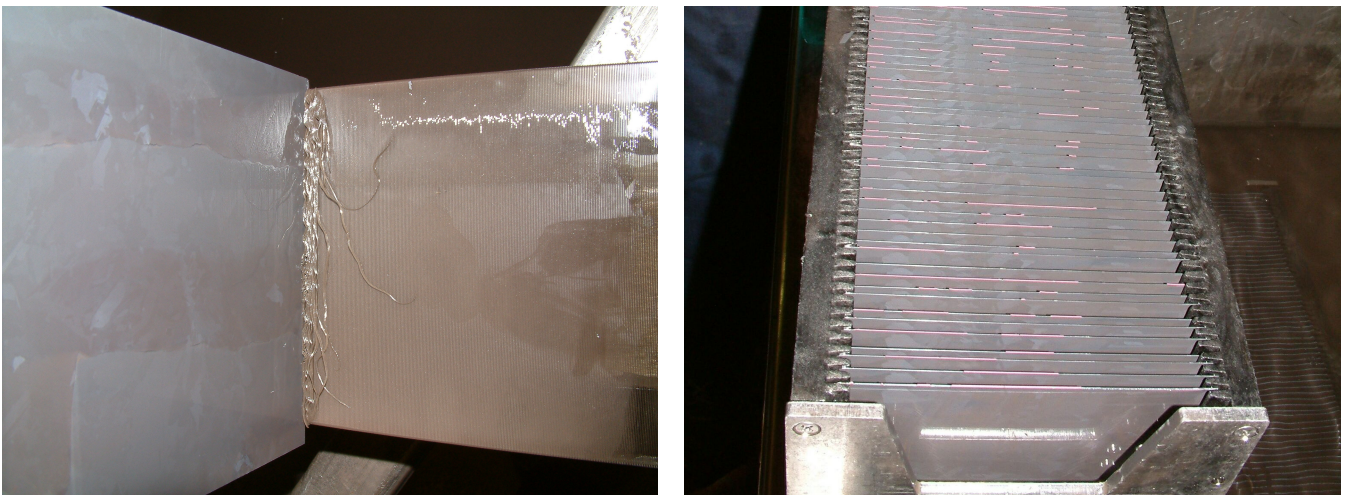


Abbildung 3.6: Kleberreste am gesägten Ingot (links) und nach Einordnung in den Carrier (rechts)

Solche Kleberreste können sich auch nach der Vorreinigung noch an der Waferkante befinden. Daher muss der Vereinzelungsmechanismus mit den Kleberresten in geeigneter Weise umgehen können. Speziell eine Unterbrechung der Vereinzelung durch Kleberreste ist zu vermeiden. Sollten die Kleberreste sich an

Stellen akkumulieren, welche den Vereinzelmechanismus beeinträchtigen, müssten diese periodisch entfernt werden. Eine Anlagengestaltung, bei welcher Kleber- und auch Waferreste während des Prozesses abgetragen werden, ist für den Durchsatz daher vorteilhaft.

### 3.7 Abtransport der Wafer

Der Abtransport der Wafer nach der Vereinzlung kann mit am Markt verfügbaren Komponenten realisiert werden. Dazu wird ein Gurtförderer gewählt, wie er auch in industriellen Anlagen zum Einsatz kommt (vergleiche auch Reddig [2009]). Das Prinzip des Abtransports richtet sich nach der Art der Endreinigung der vereinzten Wafer.

- **Reinigung in der Kasette (Batch-Prinzip)**

Die Wafer werden in Kassetten (Carrier) durch mehrere einzelne Bäder mit verschiedenen Medien geschleust. Durch Umströmung und teilweise auch Ultraschall wird zusätzlich eine mechanische Reinigungswirkung erzielt. Die Carrier fassen typischerweise 100 Wafer.

- **Reinigung einzelner Wafer im Durchlaufbad (Inline-Prinzip)** In den letzten Jahren hat sich verstärkt die Inline-Reinigung durchgesetzt. Damit entfällt das aufwendigere Ein- und Aushorden der Wafer, wodurch auch zusätzlicher mechanischer Stress auf die Waferkante vermieden wird. Bei der Inline Reinigung laufen die Wafer auf Rollen in mehreren Bahnen durch verschiedene Bäder. Auch bei der Inline-Reinigung wird Ultraschall zur Verstärkung der Reinigungswirkung eingesetzt.

In Abbildung 3.7 sind beide Ausprägungen des Abtransports abgebildet.

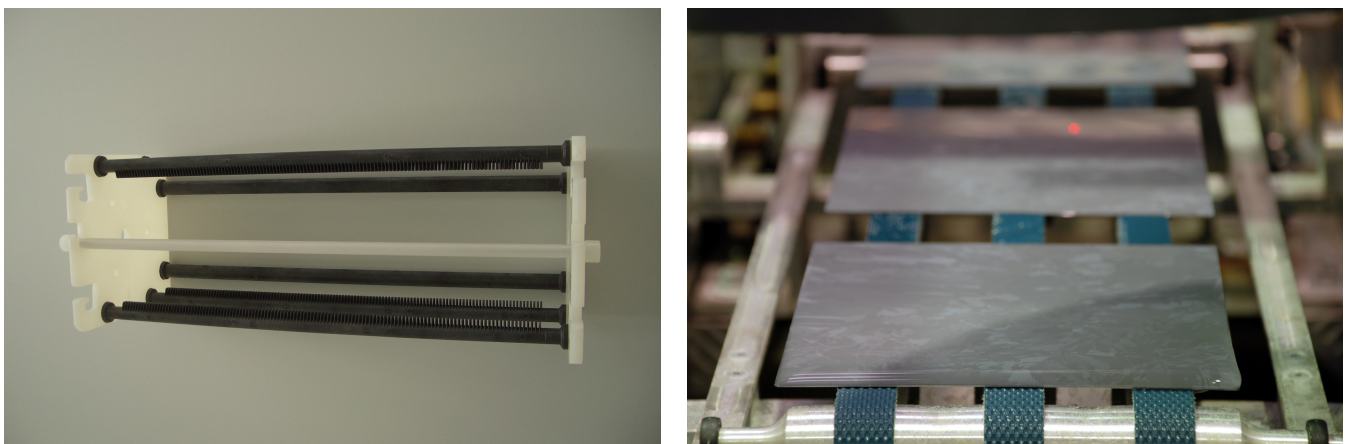


Abbildung 3.7: Carrier und Förderbänder zum Abtransport der Wafer zur Reinigung

Bei der Batchreinigung können die Wafer beispielsweise mittels eines 6-Achs Roboters oder eines anderen Manipulators nach der Vereinzelung in einen Carrier eingehordet werden. Gleiches ist auch ohne Roboter möglich, falls sich die Wafer nach der Vereinzelung auf einem Förderband befinden und sich die Kasette auf einer Hubeinrichtung in der z-Achse verschieben lässt.

Bei der Inline-Reinigung werden die Wafer mit geeigneten Vorrichtungen auf Förderbänder platziert, sofern sie sich nicht bereits auf einem solchen befinden. Falls die Vereinzelungsgeschwindigkeit die Beschickung mehrerer Bahnen in der Reinigung ermöglicht, kann auch eine Verzweigung erforderlich sein, um die Wafer auf mehrere Bahnen zu verteilen.

Eine Vereinzelungsanlage muss in beiden Fällen eng auf die nachfolgende Endreinigung abgestimmt sein, um eine gleichmäßige Auslastung der gesamten Linie zu ermöglichen. Zusätzlich sind häufig in der Linie noch Qualitätssicherungsaufgaben zu erfüllen, beispielsweise die Überprüfung der Wafer auf Beschädigungen wie Kantenausbrüche und die Ausschleusung beschädigter Wafer.

Für die direkte Schnittstelle zwischen Abtransport und Vereinzelungsmechanismus sind die im Schaubild 3.1 dargestellten Parameter von vorrangigem Interesse. Die Zuteilmenge wird in der Regel 1 betragen, da eine Mehrfach-Vereinzelung technisch kaum zu realisieren ist. Die Abführgeschwindigkeit und der Abstand zwischen den Wafern stehen in einem festen Zusammenhang. Heutige mehrbahnige Inline-Reinigungsanlagen haben einen Durchsatz von bis zu 3600 Wafern/Stunde (Rein [2007]). Derzeit erreicht nahezu keine Vereinzelungsanlage diese Geschwindigkeit, so dass typischerweise mehrere Einheiten parallel zum Einsatz kommen.

### 3.8 Anforderungen

Das Wirkprinzip der Vereinzelung soll aufbauend auf der Analyse folgenden Anforderungen genügen.

#### **A1: Das Verfahren sollte möglichst beeinflussungsarm auf den Wafer sein**

Die in der kristallinen Photovoltaik oftmals gewünschte *berührungslose* Handhabung der Wafer ist schwer oder gar nicht technisch umsetzbar. Dies liegt hauptsächlich daran, dass eine berührungslose Handhabung einen bewegten Wafer in eine undefinierte Lage bringen kann, da keine reibschlüssige Verbindung zwischen Wafer und Greifeinrichtung vorliegt. Daher ist ein Prinzip der *berührungs-*

*armen* Handhabung vorzuziehen. Die Notwendigkeit der berührungsarmen Handhabung ergibt sich jedoch aus der Anforderung, den Wafer nicht zu beschädigen, oder allgemeiner, anders als der Bewegung dienlich ist, zu *beeinflussen*. Daher ist der Begriff beeinflussungsarm hier vorzuziehen.

**A2: Das Verfahren soll die Wafer von einem Stapel vereinzeln, welcher vollständig vom Werkstückträger gelöst ist**

Diese Anforderung resultiert direkt aus der großen Streubreite der Haltekräfte der Wafer. Weiterhin kann es während des Transports, der Vorreinigung und Lagerung bereits zu unerwünschter Ablösung der Wafer kommen. Diese können dabei in eine undefinierte Lage geraten. Demnach ist eine Vereinzelung direkt vom Werkstückträger aus prozesstechnischer Sicht nicht erstrebenswert.

**A3: Die Vereinzelung aus einer Kassette sollte möglich sein**

Zur Beschickung der Anlage im industriellen Einsatz sollte das Verfahren in der Lage sein, die Wafer aus einer geeigneten Transportkassette zu vereinzeln, in welcher sich der Waferstapel befindet. Diese Anforderung resultiert einerseits aus einem möglichst unterbrechungsfreien Betrieb und andererseits dem Schutz der Wafer vor Beschädigungen.

**A4: Die Zahl der Freiheitsgrade für die Bewegung des Wafers sollte gering sein**

Aus dem Prozessziel der Vereinzelung und aus Anforderung A2 folgernd wären zwei Freiheitsgrade ausreichend. Der erste Freiheitsgrad bestimmt sich aus dem Abtransport des vereinzelteten Wafers, der zweite Freiheitsgrad bestimmt sich aus der Notwendigkeit den nachfolgenden Wafer in die Position zur Vereinzelung zu bewegen.

**A5: Der Ordnungszustand der Wafer sollte für das Vereinzeln möglichst hoch sein**

Nach Hesse [2006] definiert sich der *Ordnungszustand (OZ)* eines Werkstücks aus einem zweidimensionalen Tupel, der aus dem *Orientierungsgrad OG* (rotatorischer Freiheitsgrad) und aus dem *Positionierungsgrad PG* (translatorischer Freiheitsgrad) besteht. Je bestimmter diese Freiheitsgrade sind, desto größer ist der daraus abgeleitete Ordnungszustand  $OZ=OG/PG$ . Generell vereinfacht sich die Handhabung von Werkstücken mit höherem Ordnungszustand.

**A6: Die Vereinzelung soll Wafer mit Kleberrückständen verarbeiten können**

Kleberrückstände sind auch bei Einsatz einer Vorreinigung nicht auszuschließen. Daher sollte eine Anlage möglichst unempfindlich auf Kleberreste reagieren.

**A7: Resistenz gegenüber prozesstechnischen Einflüssen der Produktionsumgebung**

In der Produktionsumgebung bei der Waferherstellung kommen verschiedene flüssige Medien zum Einsatz, welche die verwendeten Produktionsanlagen beeinflussen. Besonders zu erwähnen sind dabei die Slurry (typischerweise ein Gemisch aus Siliziumkarbidpartikeln (SiC) und Polyethylen Glykol (PEG)) sowie die Reinigungsmedien in der Vor- und Endreinigung der Wafer. Als Beispiel für ein verwendetes Mittel wurde dabei schon das DPM in Kapitel 3 erwähnt. Des Weiteren finden bei der Waferherstellung und der anschließenden Zellproduktion Mittel Verwendung, welche die Waferoberfläche reinigen oder ätzen können (siehe auch Martin und Müller [2006], Rentsch u. a. [2009] und Mayer u. a. [2009]). Die meisten der verwendeten Medien haben gegenüber bestimmten Kunststoffen eine zersetzende Wirkung. Daher ist nicht nur bei der Auswahl der Materialien im konstruktiven Aufbau von Anlagen auf Beständigkeit zu achten, sondern auch bei der Auswahl von Komponenten wie Kabel und Umhausungen von Sensoren und Aktoren.

**A8: Erhalt eines Flüssigkeitsfilms der Wafer**

Die Wafer sollten während der Vereinzelung feucht gehalten werden. Dies ist zum einen notwendig, um die Vereinzelung zu erleichtern, da Antrocknungen die Adhäsion der Wafer aneinander verstärken würden. Zum anderen müssen angetrocknete Rückstände der Slurry oder weiterer Prozessmedien vom Wafer unter erhöhtem Aufwand in der Endreinigung wieder entfernt werden.

**A9: Hohe Störungssicherheit und Entstörbarkeit**

In den meisten Betrieben ist ein 2-Schicht oder 3-Schicht-Betrieb üblich. Daher sollte das Verfahren in der Anlagenumsetzung über längere Perioden ohne Störung oder Wartungsanforderung betriebsbereit sein. Auftretende Störungen sollten schnell behoben werden können. Dies schließt die leichte Zugänglichkeit zu den relevanten Anlagenbereichen ein. Zusätzlich sollten kleine Störungen durch den Bediener zu beheben sein, da die Verfügbarkeit des technischen Wartungspersonals nicht zu jeder Schicht gewährleistet werden kann. Das Verfahren sollte die beschriebenen Umstände berücksichtigen.

**A10: Hohe Ausbeute und geringer Bruch**

Derzeit ist eine Bruchrate von 0,5-1% in der Vereinzelung als Maximalwert üblich. Ein Verfahren sollte so gestaltet werden, dass dieser Wert in der Umsetzung der Anlage auch erzielbar ist.

#### **A11: Vermeidung doppelter Wafer**

Bei der Vereinzelung kann es durch unzureichende Separierung zur Vereinzelung von mehreren aneinander haftenden Wafer kommen. Dies kann technisch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Daher sollte eine Vereinzelungsanlage Mehrfachvereinzelungen entsprechend erkennen und behandeln können. Das Verfahren sollte so ausgelegt sein, dass durchschnittlich pro 1000 Wafer nur eine Mehrfachvereinzelung vorkommen kann, was in der Industrie derzeit als akzeptabler Wert angesehen wird.

**A12: Investitions- und Betriebskosten** Die Investitions- und Betriebskosten müssen so gestaltet sein, dass ein signifikanter Vorteil gegenüber der manuellen Vereinzelung entsteht. Dies ist jedoch aufgrund globaler unterschiedlicher Lohnniveaus nicht immer zu gewährleisten, da sich dadurch unterschiedliche technische Anforderungen an das System ergeben. Ein Verfahren für den industriellen Einsatz sollte in jedem Fall die betriebswirtschaftlichen Anforderungen erfüllen.

#### **A13: Adäquate Geschwindigkeit**

Eine Taktrate von 3000 - 3600 Wafern pro Stunde ist aufgrund der Komplexität des Prozesses derzeit schwierig zu erreichen, zumal unter der Anforderung, möglichst schonend als auch prozesssicher zu vereinzeln. Daher sollte ein Vereinzelungsverfahren dergestalt ausgelegt sein, dass der Einsatz mehrerer Anlagen auf den Takt und die Geometrie der darauf folgenden Prozesse abgestimmt ist. Bei einer Taktzeit der Reinigungsanlage von 3000 Wafern pro Stunde wäre daher beispielsweise eine Taktzeit von 1500 Wafern pro Stunde für die Vereinzelungsanlage wünschenswert, da so zwei Anlagen eine optimale Konfiguration darstellen würden.

### **3.9 Schlussfolgerungen aus der Analyse**

Von den bisher bekannten Verfahren zur Vereinzelung ist der Erfüllungsgrad der beschriebenen Anforderungen nicht untersucht oder bekannt. Eine eingehende Untersuchung des im Folgenden beschriebenen Verfahrens und dessen Bewertung hinsichtlich der Anforderungen ist daher notwendig.

## **4 Konzeption und Modellierung eines Vereinzlungsverfahrens mittels Flüssigkeitsstrahlen**

Basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 3 wurde das Verfahren zur flüssigkeitsbasierten Vereinzlung von Wafern entwickelt. Dabei wird der Vereinzlungseffekt durch Flüssigkeitsstrahldüsen erzeugt, was eine genaue Dosierung von Kräften ermöglicht, die auf die Wafer einwirken. Da sich bei den Untersuchungen zu den Haltekräften der Wafer auf dem Werkstückträger gezeigt hat, dass die vollständige Loslösung der Wafer vom Werkstückträger die Prozesssicherheit erhöht, wird der Mechanismus für die Zuführung loser Wafer konzipiert. Die Wafer werden dabei in horizontaler Lage als Stapel der Vereinzlung zugeführt. Damit wird ein hoher Ordnungszustand von  $OZ=(3/3)$  erzielt, wobei bei der Vereinzlung im Idealfall nur der Positionierungsgrad vermindert wird.

Zur Separierung des vereinzelteten Wafers wird eine Barriere verwendet, über welche die Wafer einzeln transportiert werden. Die Vereinzlungswirkung wird dabei durch eine Anzahl von Flachstrahldüsen erzeugt, die Flüssigkeitsstrahlen in Richtung der Barriere zwischen dem obersten Wafer des Stapels und dem darunterliegenden einbringen. Das Prinzip ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

Das Koordinatensystem, welches im Folgenden verwendet wird, wird in Abbildung 4.2 dargestellt. Daraus ergeben sich die verwendeten Richtungen und Orientierungen.

### **4.1 Vereinzlung der Wafer mit Flachstrahldüsen**

Die Vereinzlungswirkung wird von Flachstrahldüsen erzeugt. Damit wird ein Flüssigkeitsstrahl auf den Spalt zwischen dem obersten und dem darunter liegenden Wafer gerichtet, um diesen zu vergrößern. Dabei schwimmt der Wafer durch die Anströmung und das eingebrachte Volumen der Flüssigkeit auf, so dass dieser angehoben wird. Ziel ist eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Wafern, so dass der Wafer über die Barriere in x-Richtung abtransportiert werden kann. Gleichzeitig wird dabei durch die Flüssigkeitsstrahlen eine Kraft in Richtung der Barriere erzeugt. Diese Kraft soll den Wafer über die Barriere bewegen. Die zwischen den Wafern eingebrachte Flüssigkeit wird nun bevorzugt an den Seiten der Wafer



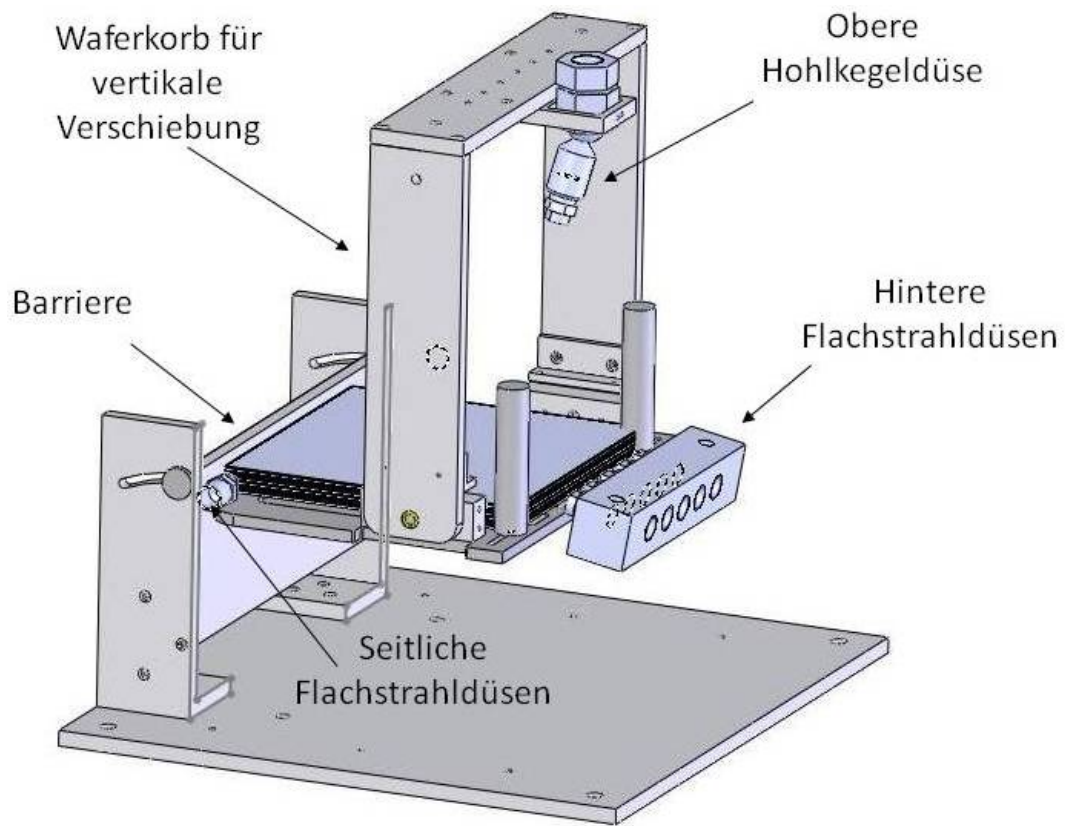


Abbildung 4.1: 3-dimensionale Darstellung des Vereinzelungsprinzips mit Flüssigkeitsstrahlen

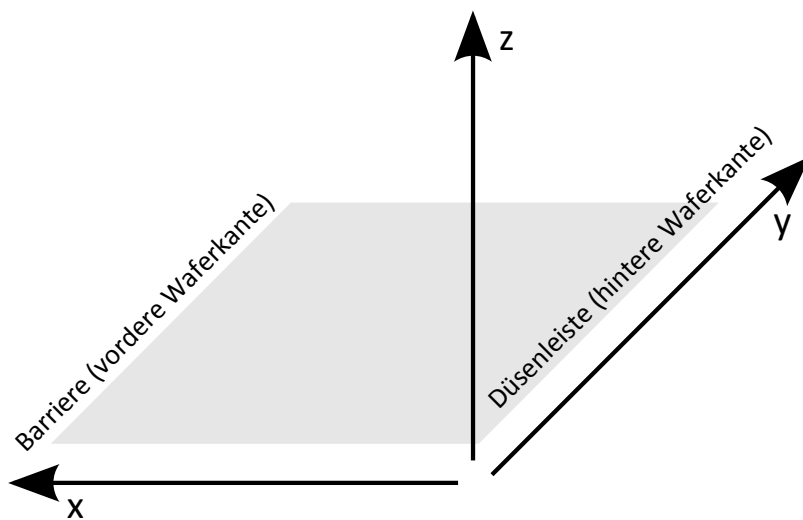


Abbildung 4.2: Koordinatensystem welches im Modell verwendet wird

ablaufen, da der Spalt zwischen der Barriere und den Wafern minimal ist und die Wafer selbst durch den Flüssigkeitsstrahl in Richtung der Barriere ein Moment erfahren. Unterhalb des Wafer wird sich dadurch ein Volumen der Flüssigkeit aufbauen, welches diesen in z-Richtung nach oben verschiebt. Erwartet wird auch eine ungleichmäßige Verteilung des Volumens unterhalb des Wafers, da sich die Flüssigkeit aufgrund der Strömungsrichtung an der Barriere staut. Gewisse Mengen der Flüssigkeit können auch in Richtung des Strahls der hinteren Flachstrahldüsen abfließen, jedoch erzeugt derselbe dort einen Staudruck, was den Rückfluss der Flüssigkeit einschränkt.

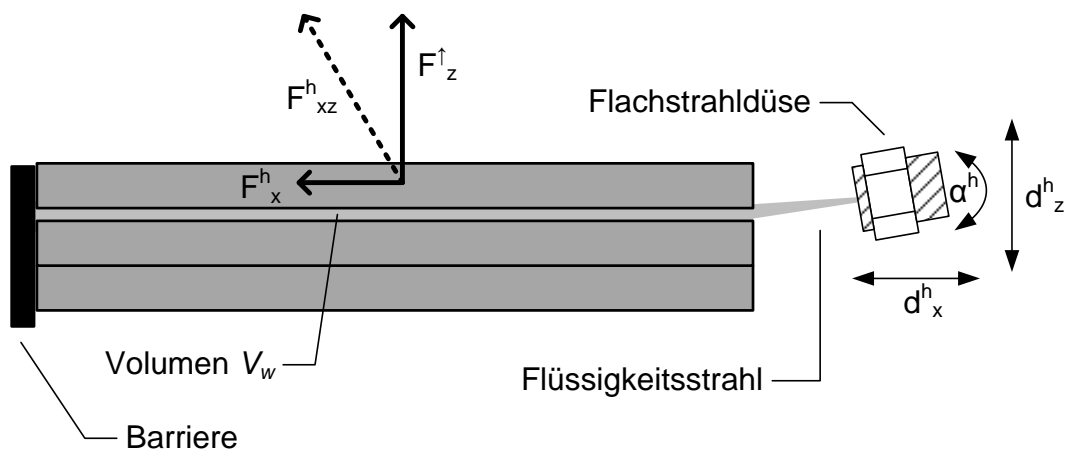


Abbildung 4.3: Seitenansicht des Vereinzelungsprinzips mit hinteren Düsen

Die Menge der eingebrachten Flüssigkeit ist einerseits vom Druck des Flüssigkeitsstrahls und des damit einhergehenden Volumenstroms abhängig, andererseits auch vom Volumen der direkt reflektierten Flüssigkeit. Über das Volumen unterhalb des obersten Wafers wird die Höhe der Wafer während der Vereinzelung definiert und damit der Übergang des Wafers über die Barriere beeinflusst. Die einwirkenden Kräfte der Flüssigkeitsstrahlen sind in Abbildung 4.3 dargestellt. In Abbildung 4.4 ist eine Aufsicht dargestellt in einer möglichen Ausprägung mit 5 Flachstrahldüsen an der hinteren Waferkante.

Die Flachstrahldüsen können dabei in folgenden Dimensionen bewegt werden:

$$d_z^h = \text{Höhe der Düsen}$$

$$d_x^h = \text{Abstand der Düsen zum Waferstapel}$$

$$\alpha^h = \text{Winkel des angreifenden Flüssigkeitsstrahls}$$

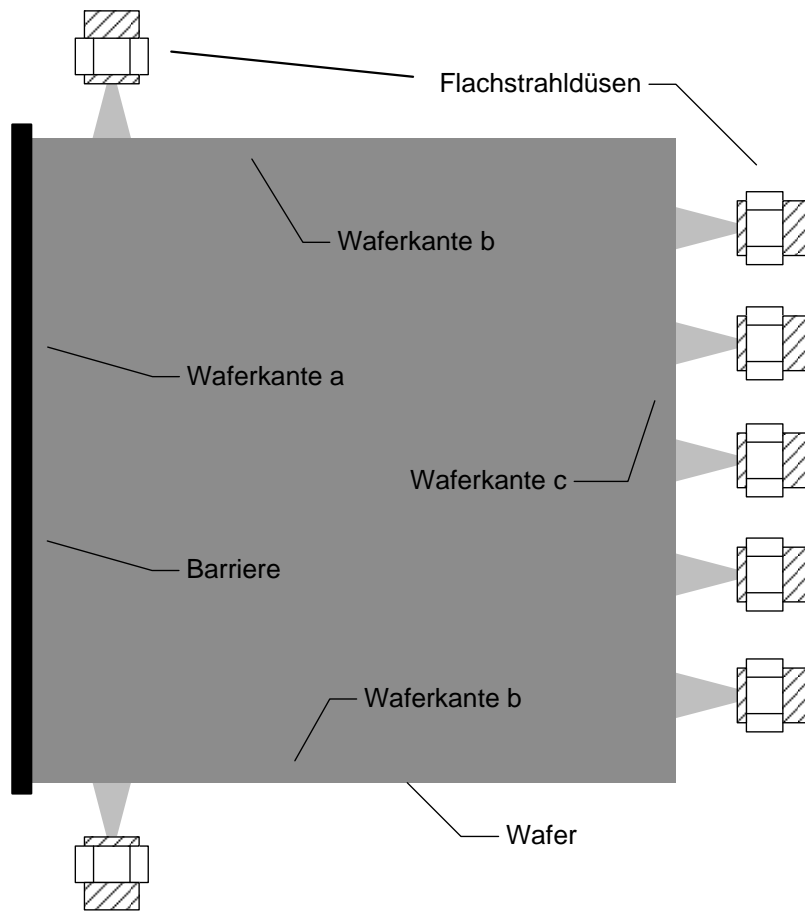


Abbildung 4.4: Aufsicht des Vereinzelungsprinzips mit hinteren Düsen

Durch die Flachstrahldüsen wird ein Flüssigkeitsvolumen in den Spalt zwischen den Wafern eingebracht, so dass sich unterhalb des obersten Wafers ein Volumen aufbaut. Somit erzeugen die Flüssigkeitsstrahlen einen Separationseffekt zwischen den Wafern, der aus der Impulskraft der Flüssigkeit sowie der Volumenkraft besteht. Ein Teil dieses Volumens fließt kontinuierlich ab. Damit wird sich ein gewisses Gleichgewicht des Volumens unterhalb des Wafers einstellen. Das durchschnittliche Volumen der Flüssigkeit unterhalb des Wafers lässt sich somit wie folgt beschreiben:

$$V_w = V_{ges} - V_{ref} - V_a - V_b - V_c \tag{4.1}$$

mit:

$V_w$  = Volumen der Flüssigkeit unterhalb des Wafers

$V_{ges}$  = Durch die Strahlen eingebrachte Flüssigkeit

$V_{ref}$  = Reflektiertes Volumen an den hinteren Waferkanten

$V_a$  = Volumen der abfließenden Flüssigkeit an der Wafervorderseite

$V_b$  = Volumen der abfließenden Flüssigkeit an den Waferseiten

$V_c$  = Volumen der abfließenden Flüssigkeit an der Waferrückseite

Das Flüssigkeitsvolumen unterhalb des Wafers erzeugt eine Kraft (Volumenkraft)  $F_z^v$  in Richtung der z-Achse. Durch die hinteren Flachstrahldüsen wird weiterhin eine Impulskraft direkt auf den Wafer aufgebracht. Damit ergeben sich durch die Flüssigkeitsstrahlen der hinteren Flachstrahldüsen auf den Wafer folgende Kraftvektoren:

$F_x^h$  = Kraft in Richtung der Barriere

$F_z^\uparrow$  = Kraft in vertikaler Richtung

$F_{xz}^h$  = Resultierender Kraftvektor

Die Kraft  $F_x^h$  resultiert aus dem Auftreffen des Flüssigkeitsstrahls auf die Waferkante als auch zu einem gewissen Teil aus der Strömung unterhalb des Wafers, welche den Wafer in Richtung der Barriere drückt. In Richtung der Barriere hebt sich die Kraft  $F_x^h$  durch den Gegendruck der Barriere auf, solange der Wafer dort festgehalten wird.

In z-Richtung wirkt die schon erwähnte Volumenkraft sowie die Impulskraft  $F_z^x$ . Die Impulskraft  $F_z^x$  hängt stark vom Angriffswinkel  $\alpha^h$  ab (siehe Abschnitt 4.16). Der Angriffspunkt der Kraft  $F_z^x$  liegt je nach Winkel  $\alpha^h$  an der Waferkante c, während die Volumenkraft  $F_z^v$  flächig auf den Wafer wirkt. Dies wird in Kapitel 5 näher analysiert. Die Kraft  $F_z^\uparrow$  resultiert aus dem Volumen der eingebrachten Flüssigkeit, temporären Turbulenzen durch den Flüssigkeitsstrom, welche in vertikaler Richtung wirken und aus der Anströmung der Flüssigkeit, welche vom Winkel  $\alpha^h$  abhängig ist. Die resultierende Kraft  $F_z^\uparrow$  ist in der folgenden Gleichung zusammengefasst.

$$F_z^\uparrow = F_z^v + F_z^h \quad (4.2)$$

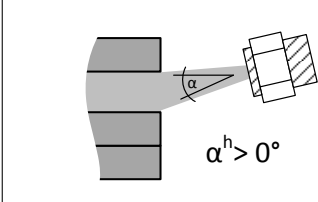
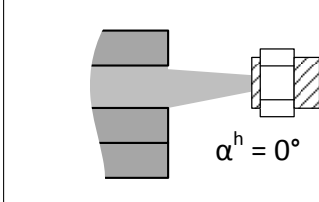
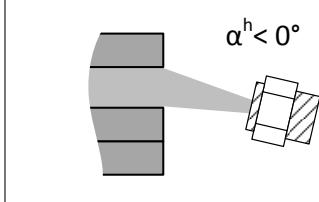
Zunächst wird der Fall betrachtet, dass der Wafer an der Barriere festgehalten wird. Bei Beaufschlagung des Wafers mit dem Flüssigkeitsstrahl wird sich bei konstantem Volumenstrom ein Gleichgewicht bezüglich des Volumens  $V_w$  einstellen, welches jedoch instabil ist. Dies liegt an der Vielzahl an Turbulenzen, die durch den Flüssigkeitsstrahl eingebracht wird (siehe Abschnitt 5.4) und den Wafer bewegen. Dadurch ändern sich das Volumen und die Verteilung der Flüssigkeit unterhalb des Wafers um einen mittleren Wert. Die Kraft  $F_z^\uparrow$  wird zeitweilig ansteigen und abfallen. In diesem instabilen Gleichgewichtsfall wirken auf den Wafer die Adhäsionskräfte der darunter befindlichen Flüssigkeit, der äußere Luftdruck, sowie Flüssigkeitsanteile auf der Oberfläche des Wafers.

Die resultierende Kraft  $F_{xz}^h$  aus  $F_x^h$  und  $F_z^\uparrow$  erzeugt ein Drehmoment an der *Waferkante a* (siehe Abbildung 4.4), welcher durch  $F_x^h$  eine reibinduzierte mechanische Verankerung an der Barriere eingeht. Je nach Größe der Kräfte  $F_z^\uparrow$  und  $F_x^h$  kann der Wafer einen solchen Impuls erfahren, welcher die Adhäsionskräfte mit dem Volumen  $V_w$  der Flüssigkeit überwinden kann. Damit kann der Wafer eine nicht definierte Lage einnehmen, beispielsweise in eine vertikale Position gelangen.

Die Stabilisierung der Waferlage ist daher erforderlich, da dieser andernfalls starken Vibrationen und Lageveränderungen unterworfen wäre. Diese werden durch eine Vielzahl von Einflüssen hervorgerufen. Bei der Berührung der Waferkanten mit der Barriere oder auch den seitlichen Führungen entstehen unterschiedliche Momente, welche durch Unebenheiten der Oberflächen oder der Waferkanten determiniert sind. Die einzelnen Einwirkungen auf den Wafer bewirken in Summe die periodischen Lageveränderungen. Weiterhin entstehen Turbulenzen bei den Flachstrahldüsen und den dadurch wirkenden Kräften, welche durch die Kreiselpumpe hervorgerufen werden. Zum einen ist eine Kreiselpumpe nicht pulsationsfrei, da beim Durchgang einer Laufradschaufel am Druckstutzen ein Druckstoß entsteht, welcher sich im Förderstrom widerspiegelt (vergleiche Kalinowski [2004]). Zum anderen ist der Flüssigkeitsstrahl aus den Düsen ebenfalls mit Turbulenzen behaftet.

Der Winkel  $\alpha^h$  der hinteren Düsenleiste hat ebenfalls einen Einfluss auf das Vereinzelungsergebnis. Prinzipiell können drei Szenarien unterschieden werden. Diese Szenarien und die vermuteten Effekte sind in Tabelle 4.1 dargestellt und werden in Kapitel 5 experimentell verifiziert.

Tabelle 4.1: Einstellungen der hinteren Düsenleiste

|                   |   |   |  |
|-------------------|---|---|--|
|                   |  |  |  |
| $\alpha^h$        | $> 0$   | $= 0$   | $< 0$  |
| Vermuteter Effekt | Unterer Wafer wird durch den Flüssigkeitsstrahl zurückgehalten                    | Geringe Kräfte auf den Wafer bei gutem Vereinzelseffekt                           | Gute Ausprägung der Kraft $F_z^h$  |

## 4.2 Gegenkraft mit Hohlkegeldüse

Aufgrund der im vorigen Abschnitt beschriebenen Kräfte, speziell der resultierenden Kraft  $F_{xz}^h$ , ist es vorteilhaft, die Lage des Wafers zu stabilisieren, die Kraft  $F_z^\uparrow$  durch eine Gegenkraft zu kompensieren und gleichzeitig die Kraft in Richtung der x-Achse zu verstärken. Dazu wird eine weitere Flüssigkeitsdüse vorgesehen. Der Strahl dieser Flüssigkeitsdüse erzeugt dabei eine Kraft entgegengesetzt der Kraft  $F_z^\uparrow$  sowie entlang der x-Achse. Die Kraft in Richtung der x-Achse verstärkt die Kraft  $F_x^h$  und dient dem initialen Abtransport der Wafer. Die Summe dieser Kräfte in x-Richtung muss groß genug sein, um die Barriere bei erfolgter Separation zu überwinden. Um die Kraft möglichst gleichmäßig auf den Wafer zu verteilen, wird dazu eine Hohl- oder Vollkegeldüse eingesetzt. Die Anordnung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Durch die obere Düse werden folgende Kräfte auf den Wafer aufgebracht:

$$F_x^o = \text{Kraft in Richtung der Barriere}$$

$$F_z^o = \text{Kraft in vertikaler Richtung}$$

$$F_{xz}^o = \text{Resultierender Kraftvektor}$$

Ähnlich wie die Flachstrahldüsen kann auch die obere Düse prinzipiell in ihrer Position, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, verändert werden. Bei Verwendung einer einzelnen Düse ist es aus Symmetriegründen nicht erforderlich, die Düse in y-Richtung zu verschieben.

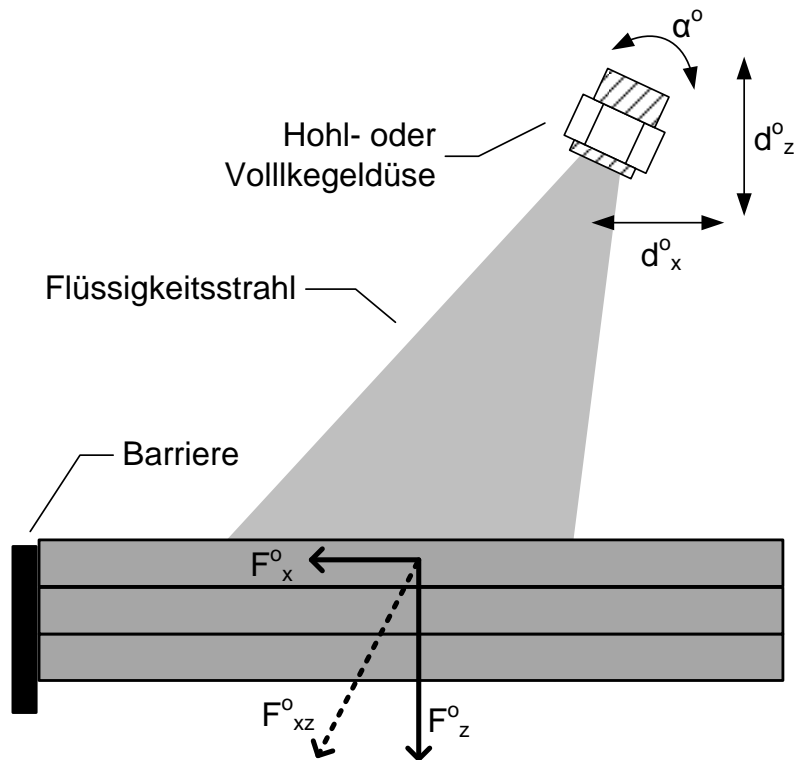


Abbildung 4.5: Seitenansicht des Vereinzelungsprinzips mit oberer Düse

$d_z^{\circ}$  = Höhe der oberen Düse

$d_x^{\circ}$  = Angriffspunkt der oberen Düse relativ zum Waferstapel

$\alpha^{\circ}$  = Winkel des angreifenden Flüssigkeitsstrahls der oberen Düse

### 4.3 Erweiterung mit seitlichen Separationsdüsen

Zur Verstärkung des Separationseffektes werden zwei weitere Flachstrahldüsen vorgesehen, die seitlich am Wafer angreifen. Für die Position dieser Düsen erscheint eine Anordnung nahe bei der Barriere sinnvoll. Damit könnte der Flüssigkeitseintrag so verstärkt werden, dass die Überwindung der Barriere erleichtert wird. Die seitlichen Flachstrahldüsen sind auch in Abbildung 4.4 dargestellt.

Beim Einsatz der seitlichen Düsen ist eine Kraft in y-Richtung zu erwarten, da sich die Kräfte aus den seitlichen Düsen aufgrund leicht unterschiedlicher Anordnung und variierenden Volumenstroms nicht vollständig aufheben werden. Durch die Aufhebung der Haftreibung des obersten Wafers lässt sich dieser leicht in verschiedene Richtungen verschieben. Die resultierenden Kräfte ergeben sich damit wie folgt:

$\Delta F_y^s$  = Resultierende Kraft parallel zur Barriere mit

$$\Delta F_y^s = F_{yl}^s - F_{yr}^s$$

$F_z^s$  = Kraft in vertikaler Richtung

Die Kraft  $F_y^s$  resultiert dabei aus der Differenz der von der rechten Düse erzeugten Kraft  $F_{yr}^s$  und der von der linken erzeugten Kraft  $F_{yl}^s$ . Aufgrund der resultierenden Kraft  $\Delta F_y^s$  müssen die Wafer beim Einsatz der seitlichen Düsen gestützt werden, um ein seitliches Verschieben entlang der y-Achse zu verhindern. Dies könnte durch entsprechende Führungen oder auch durch eine Kassette erfolgen.

Bevor nun der Vereinzlungsvorgang beschrieben und analysiert wird, erfolgt zunächst eine eingehende Untersuchung und Validierung des Modells. Dazu werden zunächst zwei Fälle unterschieden:

- **Statischer Fall:** Es findet eine Vereinzlung statt, jedoch wird der Abtransport der Wafer durch eine entsprechende Erhöhung der Barriere unterbunden.
- **Dynamischer Fall:** Es findet eine Vereinzlung statt und der Wafer wird abtransportiert.

## 4.4 Analyse des Modells im statischen Zustand

Die Untersuchung des statischen Falls erlaubt eine genaue Analyse der Wirkzusammenhänge der verschiedenen Düsen, welche im dynamischen Fall aufgrund des raschen Abtransports der Wafer nicht zu erreichen wäre, da die Zeit für detaillierte Messungen zu kurz ist.

### 4.4.1 Ermittlung der Waferlage im Raum

Von Interesse für die Vereinzlung ist die Waferlage im Raum. Die Waferlage im Raum bei der Vereinzlung ohne Abtransport ist durch die in Abbildung 4.6 dargestellten Winkel und die Verschiebung des Wafers in z-Richtung beschrieben:



$$\beta_x = \text{Rotation des Wafers um die x-Achse (Rollen)} \quad (4.3)$$

$$\beta_y = \text{Rotation des Wafers um die y-Achse (Nicken)} \quad (4.4)$$

Beide Winkel sind für die Vereinzelung der Wafer mit anschließendem Abtransport von Bedeutung. Der Rollwinkel  $\beta_x$  hat Einfluss auf den Übergang des Wafers über die Barriere. Der Nickwinkel  $\beta_y$  beeinflusst neben dem Übergang des Wafers über die Barriere auch eine mögliche Rotation des Wafers um die z-Achse sobald dieser die Barriere passiert hat.

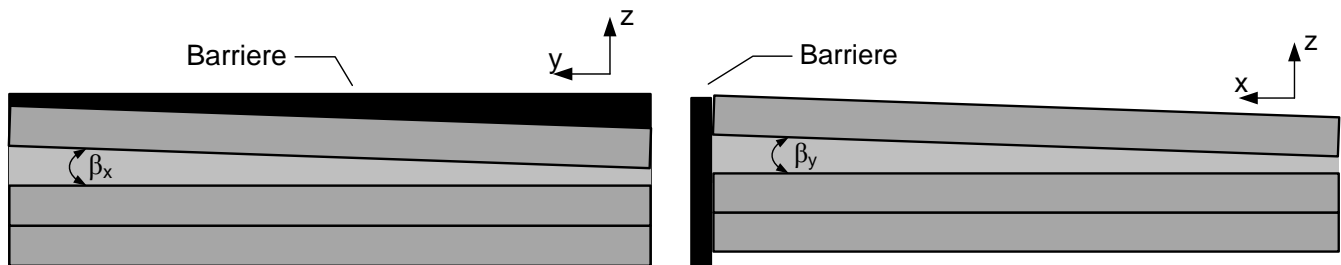


Abbildung 4.6: Winkel für die Bestimmung der Lage des vereinzelteten Wafers (Rollwinkel  $\beta_x$  und Nickwinkel  $\beta_y$ )

Eine Rotation um die z-Achse (Gieren) mit dem Winkel  $\beta_z$  ist im statischen Fall nicht möglich, da der Wafer durch die Barriere in dieser Dimension beschränkt wird.

Es werden mindestens drei Werte benötigt, um die Orientierung des (starrten) Wafers im Raum vollständig zu definieren. Zur zusätzlichen Ermittlung der definierten Winkel wird jedoch eine 4-Punkt Messung verwendet. Die Messungen erfolgen dabei in jeweils einem Quadranten der Waferoberfläche. Die Abstandsmessung kann mit geeigneten Sensoren erfolgen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

#### 4.4.2 Sensoren zur Abstandsmessung im Versuchsstand

Die Auswahl der Sensoren zur Abstandsmessung im Versuchsstand orientiert sich an folgenden Anforderungen, die sich aus dem betrachteten Werkstück, dem Versuchsstand und der Aufgabenstellung ergeben:

- **Genauigkeit** kleiner als  $50 \mu\text{m}$

Zur detaillierten Analyse der Wirkung der Flüssigkeitsstrahlen auf die Wafer ist bei einer Waferdicke von  $210 \mu\text{m}$  eine Auflösung von mindestens  $50 \mu\text{m}$  erforderlich.

- **Ansprechverhalten** kleiner 100ms

Die Experimente sollen Fluktuationen der Waferhöhe zeitlich darstellen.

- **Werkstofftauglichkeit**

Silizium ist nichtmagnetisch und in der vorliegenden Form mit einem Widerstand von 0,5-2 Ohm·cm (Herstellerangabe) bedingt leitfähig für elektrischen Strom.

- **Umgebungstauglichkeit**

Der Einsatzort des Sensors ist durch Sprühnebel und erhöhter Luftfeuchte gekennzeichnet.

- **Detektionsbereich** mindestens 100 mm

Der Sensor soll auch in einer Entfernung außerhalb des Arbeitsbereiches montiert werden können, um Bewegungsraum für den Wafer sicherzustellen.

Damit wurde zur Auswahl von typischen Industriesensoren eine Bewertungsmatrix erstellt, die in Tabelle 4.2 dargestellt ist (Vergleiche auch Hesse und Schnell [2009]).

Tabelle 4.2: Bewertungsmatrix für die Auswahl der Sensoren zur Abstandsmessung  
(●: geeignet, ◐: bedingt geeignet, ○: nicht geeignet)

|                       | Taktil | Induktiv | Kapazitiv | Ultraschall | Optoelektronisch | Mikrowellen |
|-----------------------|--------|----------|-----------|-------------|------------------|-------------|
| Genauigkeit           | ○      | ○        | ○         | ○           | ●                | ○           |
| Ansprechverhalten     | ◐      | ●        | ●         | ●           | ●                | ●           |
| Werkstofftauglichkeit | ●      | ○        | ●         | ●           | ●                | ●           |
| Umgebungstauglichkeit | ◐      | ●        | ●         | ○           | ○                | ●           |
| Reichweite            | ○      | ○        | ○         | ●           | ●                | ●           |

Aufgrund der Bewertung ist der Einsatz von optoelektronischen Sensoren empfehlenswert, da sie die größte Genauigkeit liefern können und durch vielfachen industriellen Einsatz preisgünstig und in vielen Variationen lieferbar sind. Lediglich die Kompatibilität mit der Umgebung ist nicht zufriedenstellend, da Störungen durch Flüssigkeitstropfen, Sprühnebel und Benetzung der Sensorik erwartet werden. Erste Tests haben dies bestätigt. Daher muss eine zusätzliche Einrichtung entwickelt werden, um die Messstrecke und den Sensor weitestgehend frei von störenden Einflüssen zu halten.

Die Messstrecke wird mittels einer zylindrischen Röhre aus Acrylglas freigehalten. Ohne weitere Maßnahmen würden jedoch Flüssigkeitstropfen und Sprühnebel in die Röhre und damit in die Messstrecke gelangen, wodurch der Sensor in seiner Wirkungsweise beeinträchtigt wäre. Daher wird der Sensor in

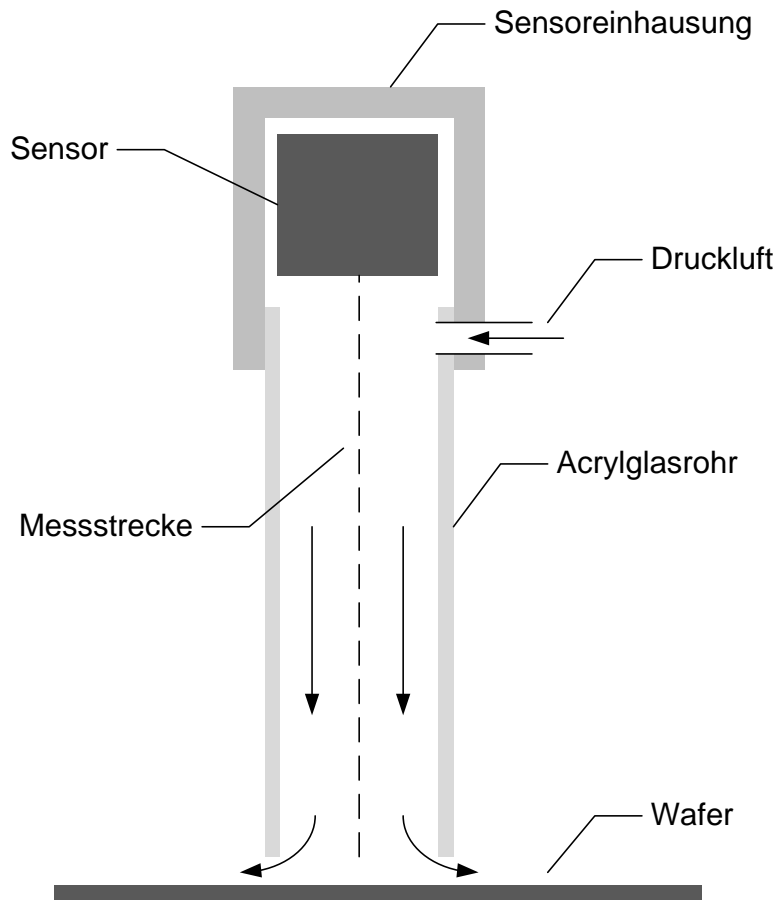


Abbildung 4.7: Querschnitt des Sensors mit Plexiglasrohr

eine separate Einhausung eingebaut, welche wiederum mit Druckluft beaufschlagt wird. Dadurch entsteht ein Luftstrom, welcher die Messstrecke bis zur Waferoberfläche freihält. Das Prinzip ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Der Luftstrom wird dabei einen Einfluss auf den Wafer haben, da eine zusätzliche Kraft  $F_z^l$  auf den Wafer einwirkt. Zur Bestimmung der Kraft wird daher der austretende Luftstrom aus dem Plexiglasrohr gemessen. Es wird ein Durchflussmesser eingesetzt, um während der Versuche den Volumenstrom konstant zu halten. Dieser gibt den Volumenstrom pro Zeiteinheit an. Durch ein Drosselventil wird der Volumenstrom eingestellt. Nach dem Durchflussmesser folgt die Aufteilung des Luftstroms auf die vier Einhausungen. In Abbildung 4.8 ist das Schema zur Einleitung und Aufteilung der Druckluft dargestellt.

Unterhalb der Austrittsöffnung wird die Kraft des austretenden Luftstroms mit einer Kraftmessdose gemessen. Diese Kraft  $F_z^l$  beträgt beim standardmäßig verwendeten Volumenstrom von 700 l/m (bei 4,5 bar) 0,396 N für alle verwendeten vier Acrylglasröhren.

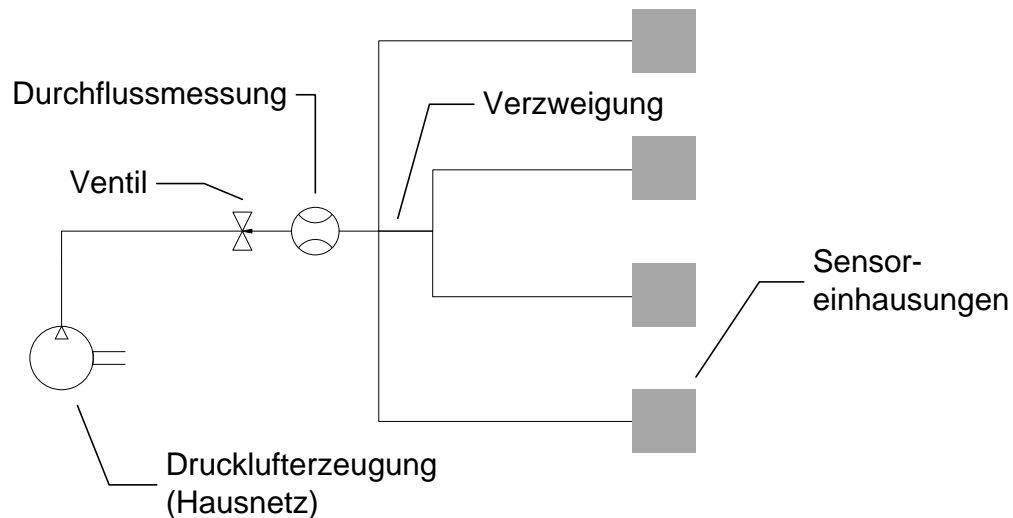


Abbildung 4.8: Schema der Druckluftaufteilung auf die Sensoren

#### 4.4.3 Aufbau des Versuchsstandes für die Erzeugung der Flüssigkeitsstrahlen

Die Düsen im Versuchsstand werden im Umlaufverfahren mit Flüssigkeit versorgt. In Abbildung 4.9 ist der Umlauf der Flüssigkeit im Versuchsstand schematisch skizziert. Aus einem zentralen Auslauf der Wanne wird der Kreislauf der Flüssigkeitsstrahldüsen gespeist. Eine Pumpe erzeugt den Druck zum Betrieb der Flachstrahldüsen. Die Versorgung der Anlage erfolgt über das Druckrohr. Der Flüssigkeitsstrom des Druckrohres wird in drei Stränge aufgeteilt. Jeder dieser Stränge ist mit einem Filter, Ventil und Manometer ausgestattet. Der Filter hält eventuellen Schmutz zurück, welcher die Düsen verstopfen könnte. Die Ventile erlauben die individuelle Regulierung des Drucks der Flüssigkeitsdüsen, welcher mittels eines Manometers gemessen wird.

Die einzelnen Stränge teilen sich wie folgt auf:

- **Hintere Flachstrahldüsen:** Aufteilung des Stranges auf vier Flachstrahldüsen
- **Seitliche Flachstrahldüsen:** Aufteilung des Stranges auf zwei Flachstrahldüsen
- **Obere Hohlkegeldüse:** Direkte Abzweigung vom Verteilerrohr

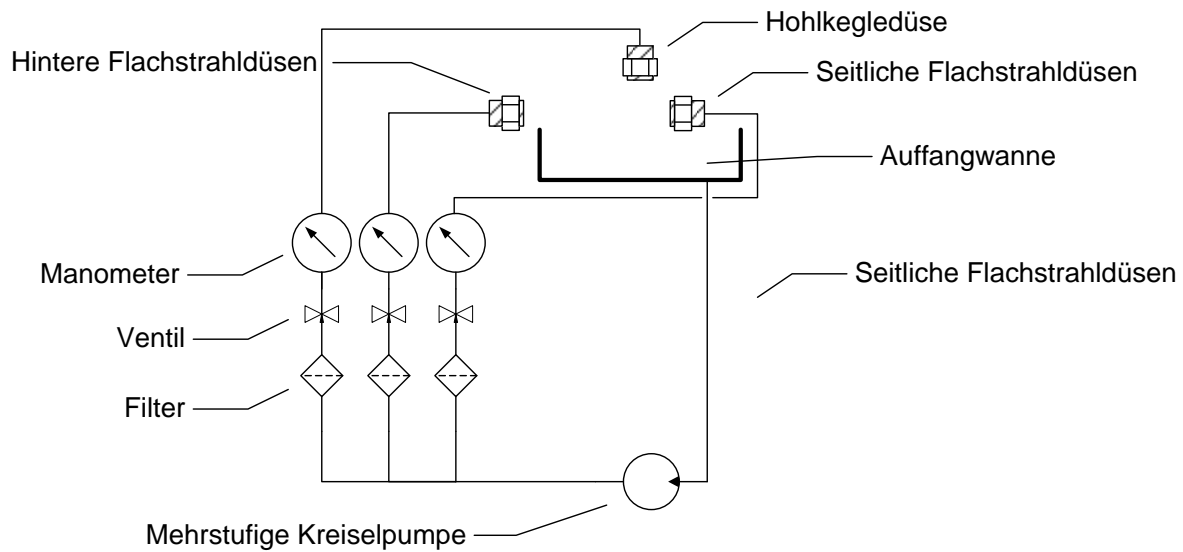


Abbildung 4.9: Prinzipskizze des Versuchssandes

## 4.5 Kräfte der Flüssigkeitsstrahlen

Aufgrund der Akzeptanz in der Fertigung von demineralisiertem und deionisiertem Wasser (DI-Wasser) bei der Lagerung und Reinigung der Wafer (vergl. Martin und Müller [2006]) wird auch bei den Versuchen und dem Betrieb des Versuchssandes auf Wasser als Medium für die Vereinzelung zurückgegriffen. Damit steht ein kostengünstiges, chemisch neutrales und nahezu inkompresibles Medium zur Verfügung. Durch das Medium Wasser werden die Kräfte erzeugt, welche die Wafer vereinzeln und die Waferlage beeinflussen.

Zur Berechnung des Systemsdrucks wird die Druckgleichung von Bernoulli für inkompresible und strömende Medien verwendet (siehe auch Truckenbrodt [2008]).

$$p_{ges} = p_{st} + p_{pot} + p_{dyn} \quad (4.5)$$

mit

$p_{ges}$  = Gesamtdruck in *bar*

$p_{st}$  = Statischer Druck in *bar*

$p_{pot}$  = Potentieller Druck in *bar*

$p_{dyn}$  = Dynamischer Druck in *bar*

#### 4.5.1 Statischer Druck und dessen Änderung im Rohrleitungssystem

Der statische Druck innerhalb der Rohrleitungen wird mittels der Manometer gemessen. Der statische Druck wird jedoch durch Komponenten im Rohrleitungsweg beeinflusst, was im folgenden analysiert wird. Das eingesetzte Medium Wasser kann dabei als **inkompressibles Medium** betrachtet werden, da nach Schade u. a. [2007] der Volumen-Ausdehnungskoeffizient  $1,8 \cdot 10^{-4}$  beträgt bei einer Temperatur des Wassers von 20°C.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Druckrohr lässt sich nach Herr [2006] wie folgt berechnen:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (4.6)$$

mit

$v$  = Strömungsgeschwindigkeit in  $\frac{m}{s}$

$\dot{V}$  = gemessener Volumenstrom in  $\frac{m^3}{s}$

$A$  = Querschnittsfläche des Rohrs in  $m^2$

Im Vorgriff auf die anschließend beschriebenen Experimente werden die Wasserdüsen mit Durchflüssen zwischen  $1,3 \frac{l}{min}$  und  $2,5 \frac{l}{min}$  betrieben. Die Verrohrung nach den Manometern besteht aus (hydraulisch glatten) PVC-Schläuchen mit einem Durchmesser von 10 mm. Nach Gleichung (4.6) ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten in den PVC-Schläuchen von  $0,276 \frac{m}{s}$  bis  $0,531 \frac{m}{s}$ . Zur besseren Einschätzung der Reibungsverluste ist eine Betrachtung der Strömungsform notwendig hinsichtlich des Turbulenzverhaltens. Nach Herwig [2002] liegt eine *turbulente* Strömung in Rohrleitungen dann vor, wenn die Reynoldszahl  $Re$  größer als der kritische Wert  $Re_{krit} = 2300$  ist. Die Reynoldszahl ergibt sich aus:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\eta} \quad (4.7)$$

mit

$Re$  = Dimensionslose Maßzahl zur Beurteilung der Strömungsform

$\rho$  = Dichte in  $\frac{kg}{m^3}$

$v$  = Strömungsgeschwindigkeit in  $\frac{m}{s}$

$D$  = Leitungsquerschnitt in  $m$

$\eta$  = Viskosität  $\frac{kg}{m * s}$

Mit den für Wasser üblichen Werten  $\rho = 998,20 \frac{kg}{m^3}$  bei  $20^\circ C$ ,  $\eta = 1,01 * 10^{-3} \frac{kg}{m * s}$  und den Werten aus dem vorhergehenden Abschnitt ergibt sich eine Reynoldszahl zwischen 2726 und 5243. Damit liegt beim Betrieb des Versuchsaufbaus eine turbulente Strömung in den Strängen nach den Manometern vor.

Zur Ermittlung der Strömungsverluste in Rohren kann bei turbulenter Strömung auf die folgende Formel zurückgegriffen werden (vergleiche Herr [2006]):

$$\Delta p_{st}^r = \frac{\lambda * l * \rho * v^2}{2 * d} \quad (4.8)$$

mit

$\Delta p_{st}^r =$  Druckverlust in Rohren bei turbulenter Strömung in  $\frac{N}{m^2}$

$\lambda =$  Dimensionslose Rohrreibungszahl

$l =$  Rohrlänge in  $m$

$d =$  Rohrdurchmesser in  $m$

Nach Truckenbrodt [2008] kann für die Berechnung der Rohrreibungszahl  $\lambda$  die Formel von **Blasius** verwendet werden, falls die Reynoldszahl  $Re$  folgender Ungleichung genügt:  $Re_{krit} < Re < 10^5$ . Dies ist im vorliegenden System der Fall. Die Formel von Blasius lautet:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (4.9)$$

Mit  $Re = 2307$  bzw.  $Re = 7555$  ergibt sich damit  $\lambda = 0,0437$  respektive  $\lambda = 0,0371$ . Der Druckverlust in den Leitungssträngen bei Leitungslängen von maximal 2 m liegt dann zwischen 0,0033 und 0,0104 bar. Damit ist der Druckverlust durch die Rohrreibung gegenüber den vorherrschenden Drücken im Bereich einiger Bar vernachlässigbar und wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die Druckverluste der Einbauten werden anhand der Einzelwiderstandsbeiwerte  $\zeta_n$  für alle  $n$  Komponenten berechnet. Nach Herr [2006] berechnet sich der Druckverlust bei Einbauten wie folgt:

$$\Delta p_{st}^k = \frac{\zeta * \rho * v^2}{2} \quad (4.10)$$

mit

$$\Delta p_{st}^k = \text{Druckverlust in Rohren bei turbulenter Strömung in } \frac{N}{m^2}$$

$$\zeta = \text{Dimensionsloser Widerstandsbeiwert}$$

Widerstandsbeiwerte für die einzelnen Komponenten können aus einschlägigen Tabellen entnommen oder im Einzelfall auch berechnet werden. Zunächst werden für den Strang der Flachstrahldüsen die Widerstandsbeiwerte der einzelnen Komponenten in der Reihenfolge ihres Auftretens Tabelle 4.3 angegeben (siehe Dubbel und Beitz [1997]).

Tabelle 4.3: Widerstandsbeiwerte der Komponenten im Strang der hinteren Flachstrahldüsen

| Typ             | $\zeta$ | Eigenschaften                                |
|-----------------|---------|--|
| Schlauchstutzen | 1       | Keine signifikante Querschnittsänderung      |
| Schlauchstutzen | 1       | Keine signifikante Querschnittsänderung      |
| Erweiterung     | 9       | Von 11 mm auf 30 mm                          |
| Abzweigungen    | 5       | Verteilung des Stroms auf 4 Flachstrahldüsen |
| Schlauchstutzen | 1       | Keine signifikante Querschnittsänderung      |
| Schlauchstutzen | 1       | Keine signifikante Querschnittsänderung      |

Nach Herr [2006] lässt sich der Gesamtdruckverlust eines Rohrleitungssystems auch durch Aufsummierung der einzelnen Widerstandsbeiwerte unter Verwendung der „maßgeblichen“ Strömungsgeschwindigkeit berechnen, maßgeblich in dem Sinne, dass diese sich nicht signifikant im Rohrleitungssystem verändert. Dies ist im vorliegenden System der Fall, da der Druckverlust durch die einzelnen Komponenten klein im Verhältnis zum vorherrschenden Druck ist. Damit errechnet sich der Gesamtdruckverlust der Einbauten wie folgt:



$$\sum_i \Delta p_i^k = \sum_i \frac{\zeta_i * \rho * v^2}{2} \quad (4.11)$$

Damit ergeben sich die Druckverluste durch die Komponenten im Strang der Flachstrahldüsen zu maximal 0,0253 bar (bei einem Durchfluss von  $2,5 \frac{l}{min}$ ). Die Druckverluste durch die Einbauten sind demnach höher als die der Rohrreibung, jedoch gleichermaßen für die Berechnungen der Kräfte nicht relevant. Die anderen Stränge haben entsprechend weniger Komponenten gleichen Typs, so dass die Druckverluste dort geringer sind und nicht separat berechnet werden.

#### 4.5.2 Potentieller Druck

Der potentielle Druck im System entsteht durch Höhenunterschiede in den Rohrleitungen. Dabei übt beispielsweise die Flüssigkeit im Becken einen potentiellen Druck auf das System aus. Jedoch sorgt im vorliegenden Fall nicht der Höhenunterschied, sondern eine Pumpe für den Systemdruck. Der Auslass der Pumpe ist dabei auf dem tiefsten Punkt des gesamten Systems. Daher wirkt der potentielle Druck entgegen der Fließrichtung und muss folglich vom Gesamtdruck abgezogen werden. Die Formel dazu lautet (siehe Truckenbrodt [2008]):

$$p_{pot} = \rho * g * h \quad (4.12)$$

mit

$$g = \text{Erdschwerebeschleunigung (9,81) in } \frac{m}{s^2}$$

$$h = \text{Höhendifferenz (negativ für Austrittspunkt oberhalb der Meßstelle) in } m$$

Die Höhen zwischen den Manometern und den Düsen und der daraus resultierende Druckverlust ist in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 4.4: Geodätische Druckverluste im Rohrleitungssystem

| Leitungsstrang      | Höhendifferenz h (m) | Druckverlust $p_{pot}$ (Bar) |
|---------------------|----------------------|------------------------------|
| Hintere Düsenleiste | -0,73                | -0,0715                      |
| Seitliche Düsen     | -0,73                | -0,0715                      |
| Obere Düse          | -0,84                | -0,0823                      |

### 4.5.3 Dynamischer Druck

Der dynamische Druck kann sowohl direkt als auch indirekt gemessen werden. Durch den Austritt des Wassers aus den Düsen kann der relevante Flüssigkeitsstrom genau gemessen werden. Somit können die Geschwindigkeit des Fluids in den Rohren als auch der dynamische Druck berechnet werden. Mit Gleichung (4.6) und der folgenden Gleichung für die Messung des dynamischen Drucks (siehe auch Truckenbrodt [2008]) ergeben sich damit die Werte in den Tabellen 4.5 und 4.6.

$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} * \frac{\dot{V}^2}{A^2} \quad (4.13)$$

Der relevante Querschnitt des Schlauches vor der Düse beträgt  $A = 78,54 \text{ mm}^2$ .

### 4.5.4 Gesamtdruck

Die Teilsysteme haben bei verschiedenen statischen Drücken den in den folgenden Tabellen abgebildeten Gesamtdruck mit den angegebenen Durchflussmengen.

Tabelle 4.5: Drücke (in bar) und Durchflussmengen (in  $\frac{l}{min}$ ) des Teilsystems der oberen Kegeldüse

| $p_{ges}^o$ | $p_{st}^o$ | $p_h^o$ | $p_{dyn}^o$ | $\dot{V}^o$ |
|-------------|------------|---------|-------------|-------------|
| 0,9212      | 1          | -0,0823 | 0,0035      | 1,25        |
| 1,9250      | 2          | -0,0823 | 0,0073      | 1,8         |
| 2,9286      | 3          | -0,0823 | 0,0109      | 2,2         |
| 3,9317      | 4          | -0,0823 | 0,0140      | 2,5         |
| 4,9353      | 5          | -0,0823 | 0,0176      | 2,8         |
| 5,9393      | 6          | -0,0823 | 0,0216      | 3,1         |

Tabelle 4.6: Drücke (in bar) und Durchflussmengen (in  $\frac{l}{min}$ ) des Teilsystems der hinteren Düsenleiste

| $p_{ges}^h$ | $p_{st}^h$ | $p_h^h$ | $p_{dyn}^h$ | $\dot{V}^h$ |
|-------------|------------|---------|-------------|-------------|
| 0,9303      | 1          | -0,0715 | 0,0018      | 0,9         |
| 1,9323      | 2          | -0,0715 | 0,0038      | 1,3         |
| 2,9343      | 3          | -0,0715 | 0,0058      | 1,6         |
| 3,9366      | 4          | -0,0715 | 0,0081      | 1,9         |
| 4,9384      | 5          | -0,0715 | 0,0099      | 2,1         |
| 5,9404      | 6          | -0,0715 | 0,0119      | 2,3         |
| 6,9425      | 7          | -0,0715 | 0,0140      | 2,5         |

## 4.6 Kraftmodell bei der Vereinzelung der Wafer

Bei der Vereinzelung (ohne Abtransport der Wafer) im Versuchsstand wirken die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Kräfte gleichzeitig. Im Folgenden wird dieses kombinierte Modell der Kräfte angewandt und analysiert.

### 4.6.1 Berechnung der Impulskraft der oberen Hohlkegeldüse

Die folgenden Einzelkräfte wirken in vertikaler Richtung von oben auf den Wafer:

- Impulskraft  $F_z^o$  des auftreffenden Wasserstrahls der Hohlkegeldüse
- Gewichtskraft  $F_z^w$  des auf der Oberfläche des Wafers befindlichen Wassers
- Impulskraft  $F_z^l$  der Luftströmung aus den Acrylglasrohren

Dabei sind die Kräfte  $F_z^w$  und  $F_z^l$  als Störgrößen zu betrachten, die ergänzend berücksichtigt werden müssen, wobei die Kraft  $F_z^w$  auch im dynamischen Fall beim Abtransport der Wafer auftritt. Die Kräfte werden wie folgt zusammengefasst.

$$F_z^\downarrow = F_z^o + F_z^w + F_z^l \quad (4.14)$$

Die Kraft  $F_z^o$  kann mit Hilfe der Gleichung (4.6) und der Impulsgleichung berechnet werden. (Vergleiche Herwig [2002]) Der dafür benötigte Massenstrom  $\dot{m}^o$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$\dot{m}^o = \dot{V}^o * \rho \quad (4.15)$$

Damit lässt sich die Impulskraft ermitteln:

$$F_z^o = \dot{m}^o * v^o * \sin\alpha^o \quad (4.16)$$

Dabei ist  $\alpha^o$  der Angriffswinkel des Flüssigkeitsstromes mit der Randbedingung, dass keine Stromlinienkrümmung innerhalb des Strahls vorliegt und der Strahl der Hohlkegeldüse symmetrisch ist. Dies kann bei der kurzen Entfernung von Düse zum Substrat angenommen werden. Im Vorgriff auf Kapitel 5 ist die kleinste Austrittsgeschwindigkeit der oberen Düse  $74 \frac{m}{s}$ . Damit beträgt die Zeit zum Auftreffen des

Strahls auf der Waferoberfläche  $\sim 0,002$  Sekunden. In dieser kurzen Zeitspanne sind relevante Geschwindigkeitsänderungen in x- sowie in z-Richtung nicht vorhanden. Die Form des Strahls geht nicht in die Gleichung ein, so dass diese sowohl für kreisförmige als auch schlitzförmige Düsen angewandt werden kann.

Zu beachten dabei ist jedoch eine Verminderung der Geschwindigkeit aufgrund der Einschnürung des Flüssigkeitsstrahls bei Austritt aus der Düse. Dies führt zu folgender veränderter Gleichung zur Berechnung der Kraft (vergleiche auch Truckenbrodt [2008]):

$$F_z^{o'} = \mu * \dot{m}^{o'} * v^o * \sin\alpha^o \quad (4.17)$$

$$\dot{m}^{o'} = \text{Massenstrom vor Austritt aus der Düse } \frac{kg}{m * s^2}$$

$$\mu = \text{Dimensionsloser Kontraktionskoeffizient}$$

Zur Berechnung der einzelnen Kräfte wird der Wafer als starres Substrat betrachtet. Damit kann bei symmetrischer Anordnung der Kräfte der Flächenschwerpunkt des Wafers dem Druckmittelpunkt gleichgesetzt werden.

#### 4.6.2 Berechnung der Impulskraft der hinteren Flachstrahldüsen

Im Falle des alleinigen Einsatzes der hinteren Flachstrahldüsen (ohne den Einsatz der seitlichen Flachstrahldüsen) wirkt entgegengesetzt zur Kraft  $F_z^\downarrow$  die Kraft  $F_z^\uparrow$ . Diese setzt sich zusammen aus den folgenden Einzelkräften:

- Die Kraft  $F_z^v$  aus dem Pressdruck des Wasservolumens unterhalb des Wafers
- Der vertikale Anteil der Impulskraft  $F_z^h$  des auftreffenden Wasserstrahls der hinteren Flachstrahldüsen

Der vertikale Anteil der Impulskraft  $F_z^h$  entsteht aus verschiedenen Komponenten, abhängig vom Winkel der Anströmung. Dies ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

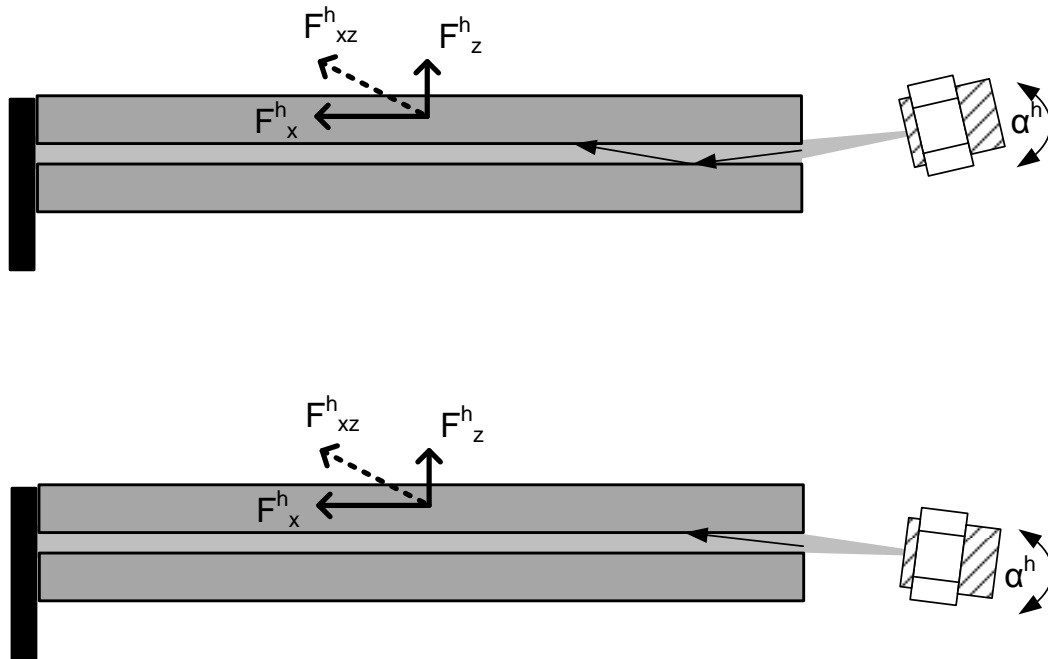


Abbildung 4.10: Vertikalkräfte der hinteren Flachstrahldüsen

Bei  $\alpha^h \gg 0$  entsteht die Kraft  $F_z^h$  aus Reflexionen des Flüssigkeitsstrahls zwischen den Wafern. Bei  $\alpha^h \approx 0$  entsteht die Kraft  $F_z^h$  aus direkter Anstrahlung in Folge des Strahlwinkels und der Reflexionen daraus. Bei  $\alpha^h \ll 0$  wird der Wafer direkt angeströmt. Kleinere Kraftanteile entstehen auch aus Reflexionen daraus. Die Kraft  $F_z^h$  wirkt in der Nähe der Waferkante. Daher ist hier besondere Aufmerksamkeit auf die kritischen mechanischen Kräfte zu legen, welche den Wafer beschädigen könnten.

Die Kraft  $F_z^v$  wirkt prinzipiell auf die gesamte Waferunterseite, durch die Anströmung ist sie jedoch nicht gleich verteilt. Im vorderen Bereich wird das Wasser in den Spalt zwischen den Wafern hineingedrückt und staut sich dann an der Barriere. Dadurch ist das Volumen unterhalb des Wafers asymmetrisch verteilt, was sich in einem in Richtung der Barriere verschobenen Druckmittelpunkt des Pressdrucks niederschlägt.

Analog zu Gleichung (4.16) und Gleichung (4.17) lässt sich auch hier die Kraft  $F_z^h$  berechnen. Dies wäre jedoch nur sinnvoll, falls der Strahl von unten angreift (negativer Winkel  $\alpha^h$ ) und dieser vollständig auf die Waferunterseite auftrifft. Davon kann in der praktischen Anwendung mit Einschränkungen ausgegangen werden. Die Einschränkungen beziehen sich darauf, dass die ideale Anströmung des Wafers durch rückfließendes Wassers beeinträchtigt wird. Im Fall  $\alpha^h \ll 0$  kann daher zur Berechnung von  $F_z^h$  analog die Gleichung (4.16) und Gleichung (4.17) angesetzt werden.

Durch die Anordnung der Kräfte  $F_z^o$  und  $F_z^h$  erfährt der Wafer ein Biegemoment, auf das in Kapitel 5 näher eingegangen wird. Zusätzlich zur Kraft  $F_z^o$  wirkt der Kraft  $F_z^\uparrow$  auch der Gewichtskraft des Wafers entgegen. Bei einem durchschnittlichen Gewicht eines 210  $\mu\text{m}$  dicken multikristallinen Wafers aus Silizium von 11,37g sind dies 0,11 Newton. Der Pressdruck des Wasservolumens unterhalb des Wafers ist Gegenstand der im folgenden Kapitel erläuterten experimentellen Untersuchungen.

### 4.6.3 Berechnung der Gewichtskraft des Wassers auf der Waferoberfläche

Die Gewichtskraft des Wassers auf der Oberfläche des Wafers kann während des Betriebs des Versuchsstandes nicht direkt berechnet oder gemessen werden. Ein typischer Zustand des Wassers auf der Waferoberfläche ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Das Wasser auf der Waferoberfläche bildet kein homogenes und stabiles Volumen, sondern ist verschiedenen dynamischen Einflüssen ausgesetzt.

- Die austretende Druckluft hält den Bereich um das Acrylglasrohr weitestgehend frei von Wasser.
- Durch Reflektion erfahren Teile des auftreffenden Wassers einen Impuls, welcher die Gewichtskraft dieser Teile zeitweise reduziert.
- Das Volumen des Wasser auf der Waferoberfläche fluktuiert.

Dementsprechend kann die Gewichtskraft des Wassers experimentell nur geschätzt werden. Dazu wird Wasser auf einen in Ruhe befindlichen Wafer gegossen. Das Volumen beträgt 0,09l, welches auf der Waferoberfläche aufgrund der Oberflächenspannung verbleibt. Bei Abriss der Oberflächenspannung an den Waferkanten und dem damit verbundenen Abfluss (bei Aufrechterhaltung des Zuflusses) verbleiben im Mittel 0,07-0,08l auf der Oberfläche. Aufgrund der eingangs beschriebenen dynamischen Einflüsse wird das Volumen des Wassers auf der Waferoberfläche während des Betriebs des Versuchsstands unterhalb dieses Wertes liegen. Es ist also von einer Gewichtskraft  $F_z^w$  von weniger als 0,00068-0,00078 N auszugehen. Für die weiteren Berechnungen wird ein Mittelwert von 0,00073 N verwendet.



## 5 Experimentelle Analyse des Modells

Die analytischen Betrachtungen werden im Folgenden durch Experimente validiert und mit unterschiedlichen Einstellungen verglichen. Dazu wird der vorab beschriebene Versuchsstand verwendet, an welchem verschiedenen Parameter variiert werden können. Die für die Experimente relevanten Parameter sind nachfolgend aufgeführt (vergleiche auch Kapitel 4):

- $p_{st}^o$ : Druck des Wassers vor der oberen Hohlkegeldüse
- $p_{st}^h$ : Druck des Wassers vor den hinteren Flachstrahldüsen
- $p_{st}^s$ : Druck des Wassers vor den seitlichen Flachstrahldüsen
- $x^o$ : Angriffspunkt für die obere Düse
- $\alpha^h$ : Angriffswinkel der hinteren Flachstrahldüsen
- Verwendung einer Kassette

Letzterer Parameter, die Verwendung einer Kassette zur Präsentation der Wafer, resultiert zum einen aus der Möglichkeit, die Beladung einer Anlage zu vereinfachen. Zum anderen soll das abfließende Volumen  $V_b$  des Wassers aus Gleichung (4.1) vermindert werden, um dadurch das Volumen  $V_w$  zu erhöhen. Somit könnte der Abstand des separierten Wafers vom nachfolgenden vergrößert werden, um eine verbesserte Separation zu erreichen. Zur Veranschaulichung ist der Versuchsstand in Abbildung 5.1 abgebildet.

Der Versuchsstand ermöglicht die Untersuchung des Separationseffekts, indem der oberste Wafer mittels der Wasserstrahlen vereinzelt, jedoch nicht abtransportiert wird. Ziel der Untersuchungen ist zum Einen die Bestimmung optimaler Parameter für eine Vereinzelung der Wafer. Zum Anderen soll ein vertieftes Verständnis für die Vorgänge während des Vereinzeln gewonnen werden. Die Erkenntnisse der Experimente gehen dann in die Ausgestaltung und den Betrieb eines Prototypen ein.



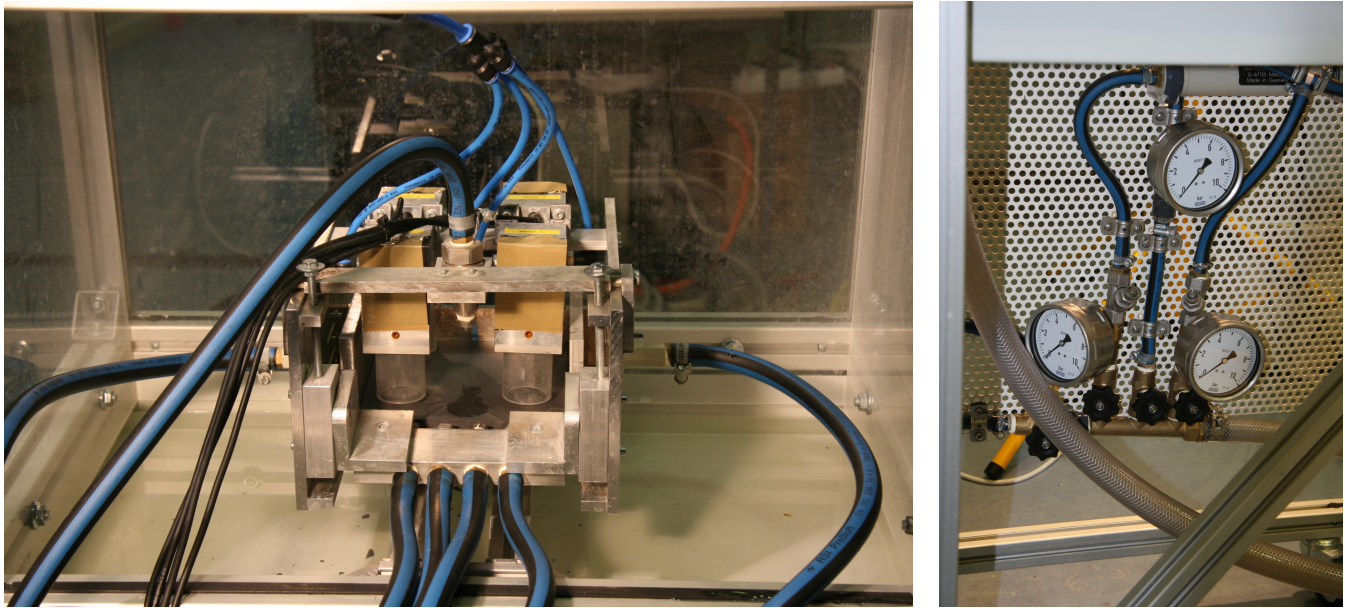


Abbildung 5.1: Ansichten des Versuchsstands

## 5.1 Beschreibung des Versuchsstandes

Der Versuchsstand wird mit Wasser betrieben, welches aus einer Wanne gefördert wird. Als Förderpumpe kommt eine mehrstufige Kreiselpumpe der Firma Grundfos zum Einsatz. Für die Düsen wurden Produkte der Firma Lechler gewählt. Im Versuchsstand werden vier Flachstrahldüsen für die hintere Anströmung und zwei Flachstrahldüsen für die seitliche Anströmung verwendet. Für die obere Düse wird eine Hohlkegeldüse verwendet. Bei einem maximalen Betriebsdruck von 10 bar wird laut N.N. [2010a] und N.N. [2010b] ein Gesamtfördervolumen aller Düsen von  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  nicht überschritten. Daher wurde die Förderpumpe entsprechend dimensioniert und erreicht eine Förderleistung von  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einem maximalen Betriebsdruck von 25 bar.

Für die Sensoren wurden Lasertriangulations-Sensoren der Firma Baumer gewählt. Der Messbereich der Sensoren beträgt 104 mm. Die theoretisch erreichbare Auflösung wird mit  $2 \mu\text{m}$  angegeben.

Die Sensoren werden über eine SPS (TwinCat) der Firma Beckhoff abgefragt. Die Sensorsignale werden durch die SPS zeitlich aufgelöst eingelesen und abgespeichert. Die Benutzeroberfläche für den Betrieb des Versuchsstandes ist in Abbildung 5.4 abgebildet. Die Messstrecke der Sensoren wird mit Druckluft weitestgehend freigehalten, um eine ausreichende Störunabhängigkeit der Messungen zu gewährleisten. In Abbildung 5.3 ist dies abgebildet. Man erkennt, dass nicht nur die Messstrecke freigehalten wird, sondern

die Waferoberfläche kaum mit Wasser benetzt wird. Die Durchflussrate der Druckluft für das Gesamtsystem aller vier Sensoren beträgt 700 l/m. Die vier Sensoren sind in einer rechteckigen Anordnung montiert, wie in Abbildung 5.2 dargestellt.

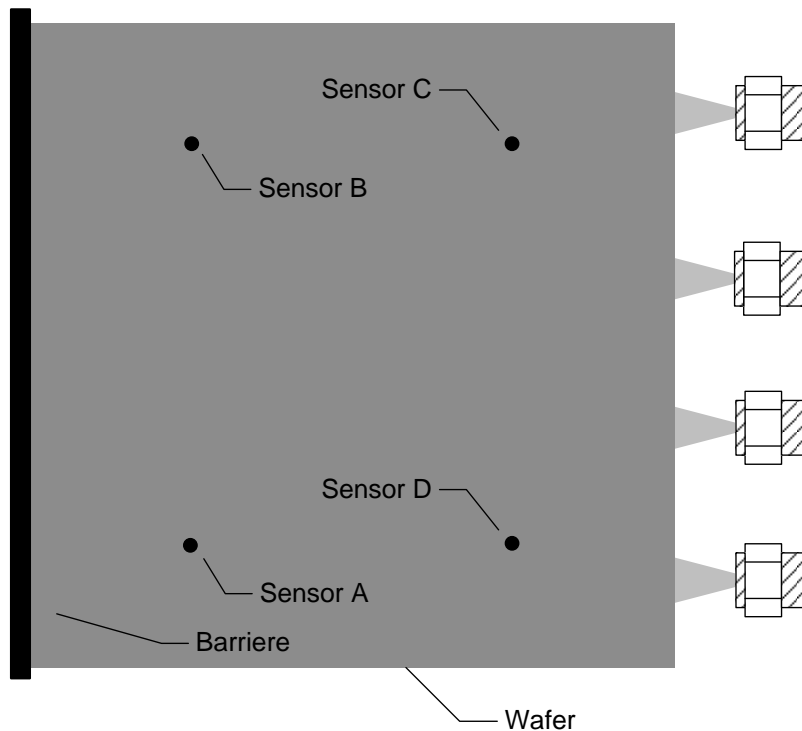


Abbildung 5.2: Anordnung der Sensormesspunkte in Bezug zur Waferoberfläche

Die eingangs beschriebene Kassette ist in Abbildung 5.5 abgebildet. In dieser Ausführung dient sie nicht primär dem Transport oder der Zuführung des Waferstapels, sondern wird für die Untersuchung des Einflusses einer Kassette auf die Vereinzelung der Wafer verwendet.

Der Abstand der Backen wird so gewählt, dass ein möglichst geringer Spalt zwischen Waferkante und Backe entsteht, um die Abfließgeschwindigkeit  $V_b$  zu vermindern. Nach Vorversuchen wurde der Parameterbereich bei einigen Einstellungen für die Versuche begrenzt. Dies ist in Tabelle Tabelle 5.1 dargestellt.

## 5.2 Berechnung und Messung der Kräfte

Von besonderem Interesse bei der Vereinzelung sind die Kräfte, welche durch die Wasserdüsen auf die Wafer wirken. Diese lassen sich sowohl mittels Gleichung (4.16) berechnen als auch durch entsprechende Sensoren messen. Zur Absicherung der Berechnung werden die verwendeten Düsen durch Kraftsensoren

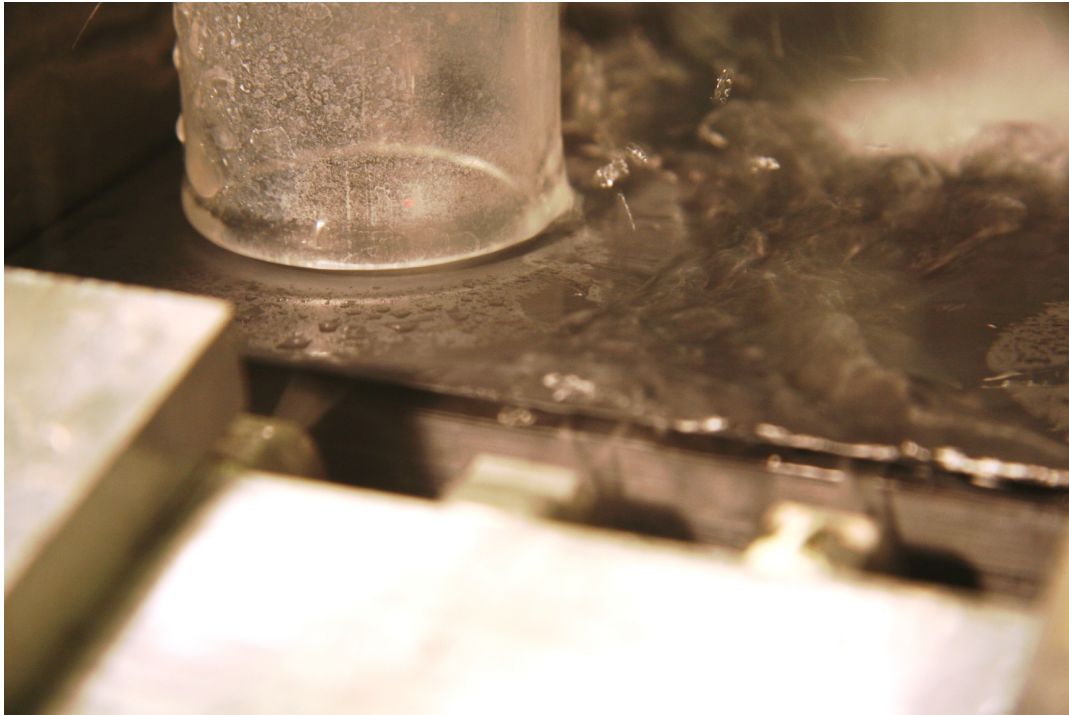


Abbildung 5.3: Mit Druckluft beaufschlagtes Acrylglasrohr

Tabelle 5.1: Verwendete Bereiche der Parameter des Versuchsstandes

| Parameter  | Wertebereich | Erläuterung   |
|------------|--------------|---|
| $p_{st}^o$ | 0-5 bar      | Höhere Drücke erhöhen nicht die Stabilität der Waferlage. Weiterhin verschlechtert sich die Vereinzelungswirkung.               |
| $p_{st}^h$ | 1-7 bar      | Höhere Drücke erzeugen zuviel Kraft auf den Wafer und verbessern die Vereinzelungswirkung nicht wesentlich.                     |
| $p_{st}^s$ | 0-10 bar     | Höhere Drücke erzeugen keine Verbesserung der Vereinzelungswirkung. Die verwendeten Düsen sind für Drücke bis 10 bar ausgelegt. |
| $\alpha^h$ | -20°-20°     | Steilere Winkel verbessern die Vereinzelungswirkung nicht und erhöhen den mechanischen Stress auf die Wafer                     |

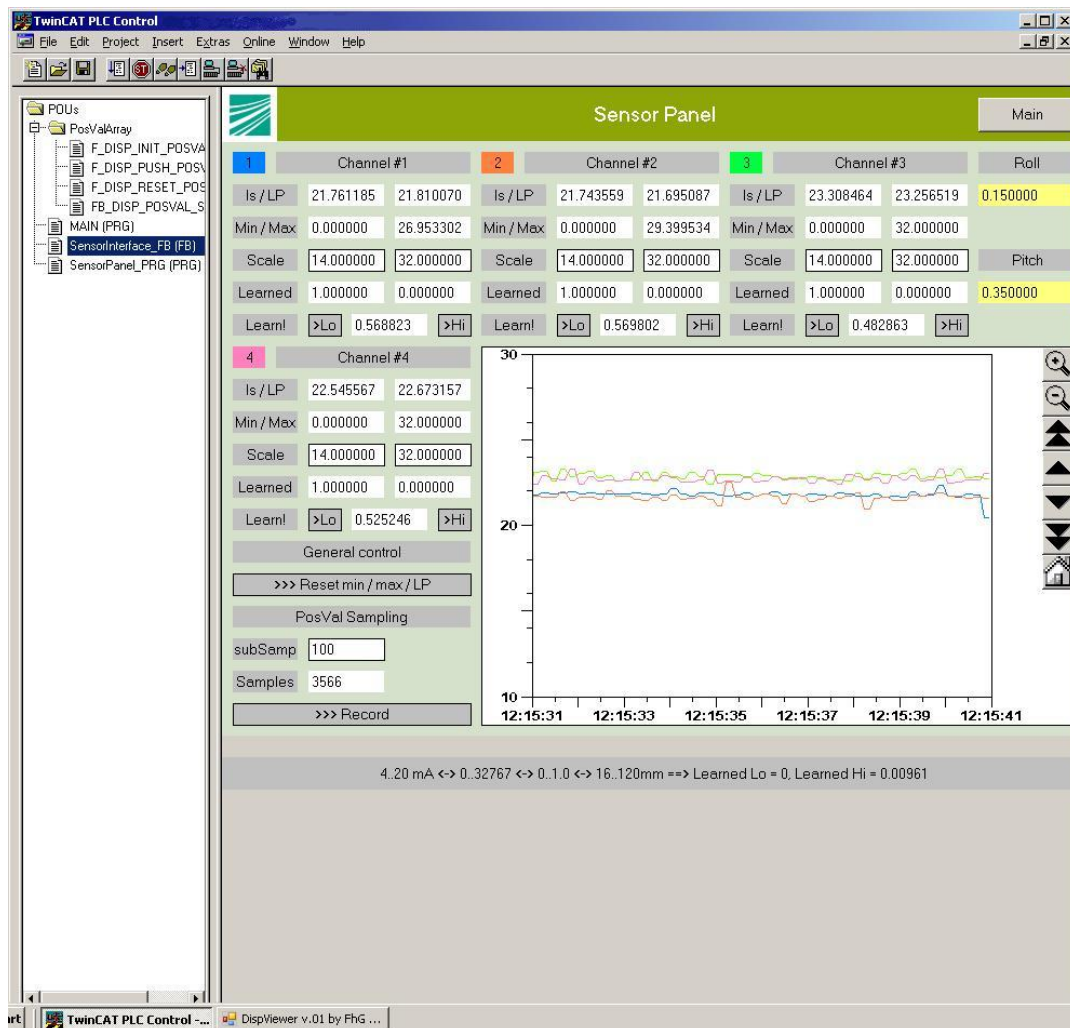


Abbildung 5.4: Benutzeroberfläche für den Betrieb des Versuchsstandes

vermessen. Dadurch können auch die Fluktuationen des Wasserstrahls gemessen werden. Für die Messungen wird ein Biegebalkensensor der Fa. Burster verwendet. Der Biegebalkensensor wird an der einen Seite an einer Aufnahme befestigt. Auf der anderen Seite wird eine Platte befestigt, auf welche der Wasserstrahl auftrifft. Ein Messverstärker nimmt die Signale des Kraftsensors auf und leitet diese an die SPS weiter, welche die Daten zeitaufgelöst aufzeichnet. Die Vorrichtung ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Mit dieser Vorrichtung werden die Flachstrahldüse als auch die Kegeldüse vermessen. Dabei wird bei beiden Düsenarten der Druck in Schritten von 1 bar erhöht und die Sensorwerte werden aufgezeichnet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen anhand des Flüssigkeitsstroms vorgestellt und verglichen. Da die Kraft der hinteren Düsenleiste über den Volumenstrom erfolgt, wird im Folgenden diese Berechnungsweise für alle Düsen verwendet.

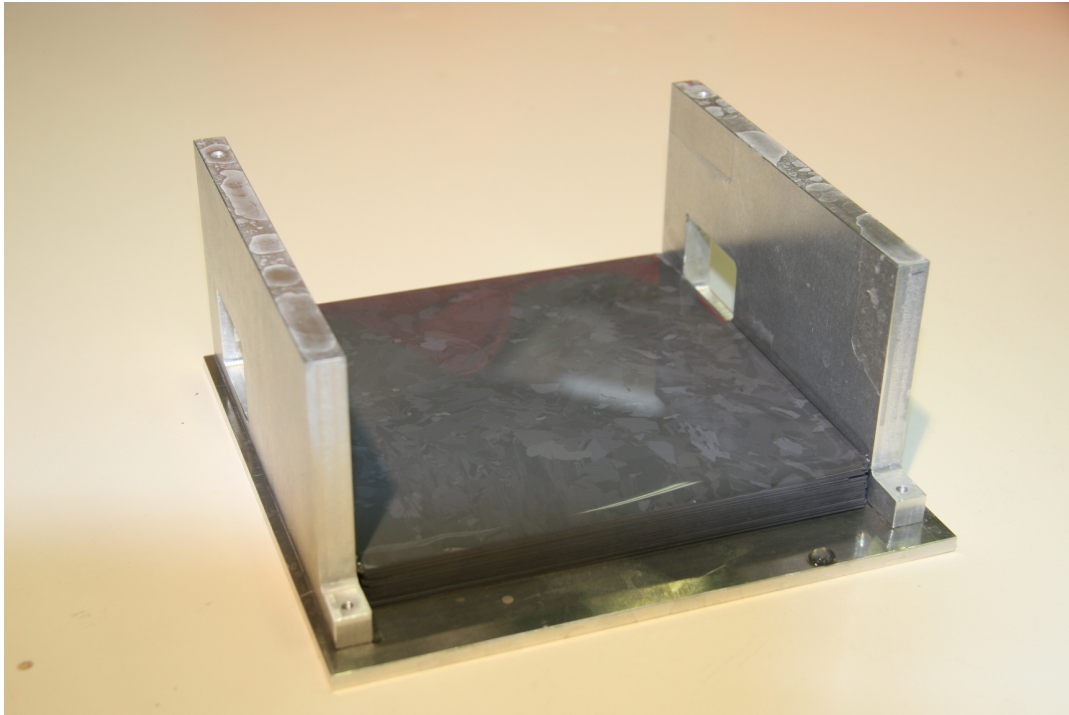


Abbildung 5.5: Kassette zur Verwendung im Versuchsstand

### 5.2.1 Kraft der oberen Hohlkegeldüse

Die Kraft der oberen Wasserdüse wirkt als Bestandteil einer Gesamtkraft auf den Wafer ein. Diese Gesamtkraft, bestehend aus den Einzelkräften Wasserstrahl, Gewichtskraft und Druckluftkraft, ist anhand von Gleichung (4.16) in Tabelle 5.2 dargestellt. Während die Gewichtskraft des Wassers im Vergleich zur Kraft  $F_z^o$  vernachlässigbar ist, hat die Kraft  $F_z^l$  einen relevanten Einfluss auf die Gesamtkraft.

Tabelle 5.2: Einzel- und Gesamtkraft in N, die von oben auf den Wafer wirkt ( $\alpha^o = 20$ )

| $p_{st}^o$ | Gesamtkraft<br>( $F_z^\downarrow$ ) | $F_z^o$ | $F_z^w$ | $F_z^l$ |
|------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| 1          | 0,6407958                           | 0,2437  | 0,0007  | 0,3963  |
| 2          | 0,90247082                          | 0,5054  | 0,0007  | 0,3963  |
| 3          | 1,15205654                          | 0,7550  | 0,0007  | 0,3963  |
| 4          | 1,37200395                          | 0,9749  | 0,0007  | 0,3963  |
| 5          | 1,62002976                          | 1,2230  | 0,0007  | 0,3963  |
| 6          | 1,89613396                          | 1,4991  | 0,0007  | 0,3963  |

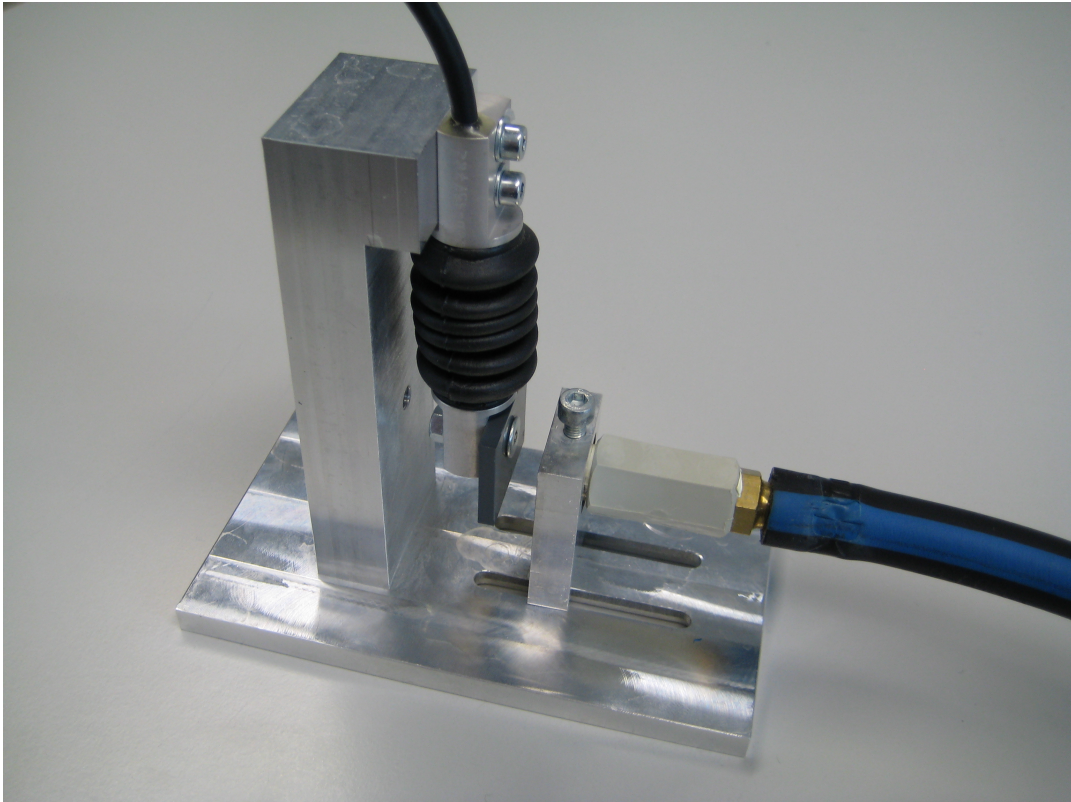


Abbildung 5.6: Vorrichtung zur Messung der Kräfte der Wasserdüsen

Der Vergleich mit den Kraftmessungen zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Die maximale Abweichung beträgt 3,2% welche weitestgehend auf Messfehler bei der Berechnung des Volumenstroms zurückzuführen ist. Ergänzend kommen noch die Ungenauigkeiten des Kraftsensors hinzu bedingt durch die Linearitätsabweichung und die Hysterese. In Abbildung 5.7 sind die Werte gegenübergestellt.

### 5.2.2 Kraft der hinteren Flachstrahldüsen

Die Kraft der hinteren Flachstrahldüsen beeinflusst den Wassereintrag zwischen die Wafer, den Vortrieb in Richtung der Barriere sowie auch direkte Kräfte auf den Wafer. In der nachfolgenden Tabelle sind die Kräfte bei unterschiedlichem statischen Druck abgebildet.

Der Vergleich mit den gemessenen Werten zeigt ähnliche Abweichungen wie bei der oberen Kegeldüse. Im unteren Bereich bei einem Bar zeigen die Ergebnisse stärkere Abweichungen (14%), während im oberen Bereich (ab 3 bar) eine Abweichung von weniger als 2% festzustellen ist.

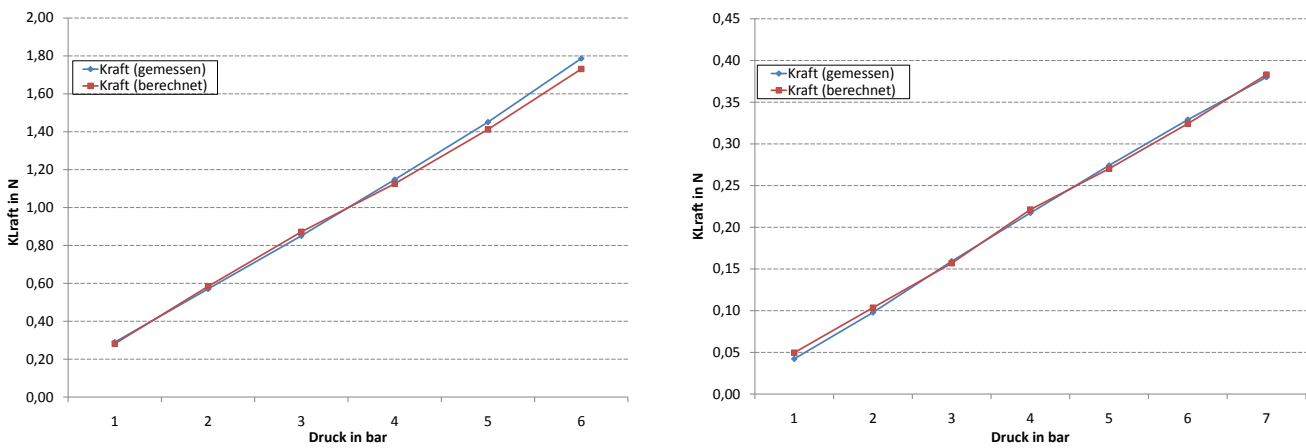


Abbildung 5.7: Vergleich der gemessenen und berechneten Kräfte der oberen Düse (links) und der hinteren Düse (rechts)

Tabelle 5.3: Kraft der hinteren Flachstrahldüsenleiste (in N) ( $\alpha^h = 0$ )

| $p_{st}^h$ | $F_x^h$ |
|------------|---------|
| 1          | 0,1986  |
| 2          | 0,4143  |
| 3          | 0,6276  |
| 4          | 0,8851  |
| 5          | 1,0812  |
| 6          | 1,2969  |
| 7          | 1,5323  |

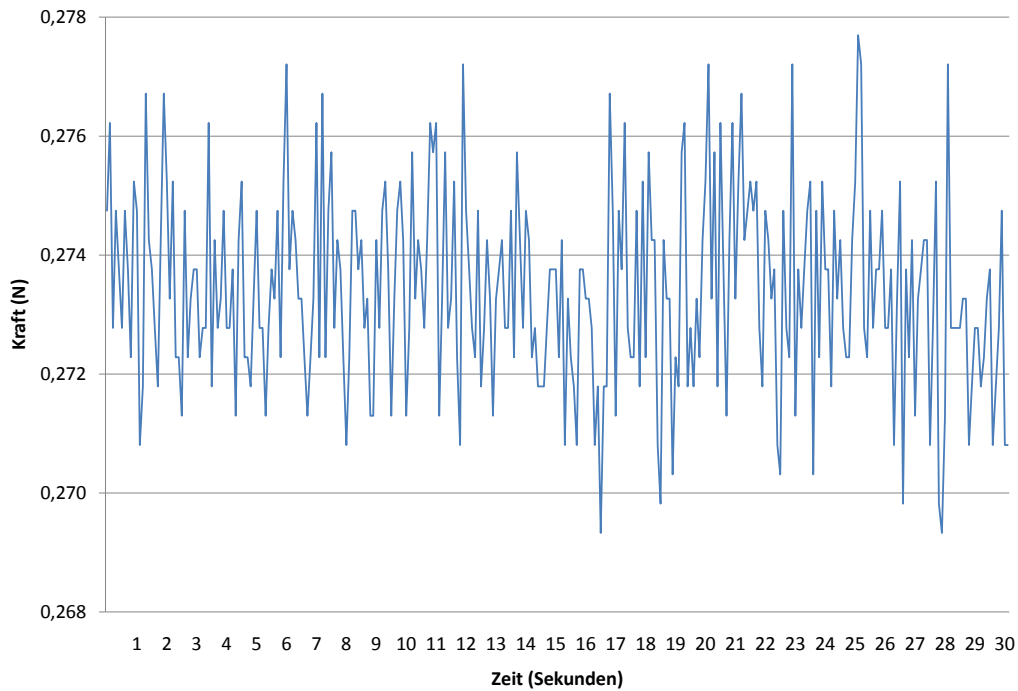
### 5.2.3 Messung der Fluktuationen

Von besonderem Interesse ist neben der Kraft der Wasserstrahldüsen auch die Variation derselben. Im Vorgriff auf die im Folgenden beschriebenen Experimente sind in Abbildung 5.8 die Variation der Kraft bei der Messung einer Flachstrahldüse abgebildet.

Der Mittelwert der Kraft der Flachstrahldüse beträgt 0,273 Newton und die Standardabweichung 0,0016. Der Variationskoeffizient (Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert) beträgt 0,0059. Damit ist die Variation der Kraft, hervorgerufen durch die Fluktuationen des Volumenstroms vergleichsweise gering. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt 5.6.1 weiter verwendet.

## 5.3 Planung der Experimente

Die eingangs beschriebenen Parameter werden in einer Reihe von Experimenten variiert. Diese Experimentreihe beginnt mit der Untersuchung des Einflusses der oberen Hohlkegeldüse in Bezug auf die Kraft des Flüssigkeitsstrahls und dessen Position. Anschließend werden die Parameter der hinteren Flach-

Abbildung 5.8: Gemessene Kräfte einer Flachstrahldüse bei  $p_{st}^h = 4$  bar

strahldüsen untersucht. Dies ist neben der Kraft der Strahlen vor allem auch der Winkel, in welchem die Flüssigkeitsstrahlen auf den Spalt zwischen den Wafern treffen. Anschließend wird der Einfluss der Kassette analysiert, insbesondere Änderungen des Abstandes des obersten Wafers. Abschließend wird der Einfluss der seitlichen Düsen auf die Vereinzelung untersucht.

Quantitativ gemessen wird der Abstand des obersten Wafers zu den Sensoren. Damit kann neben der Waferhöhe auch der Roll- und Nickwinkel bestimmt werden. Der zugehörige Experimentplan ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Experimenteplan für die Untersuchungen am Versuchsstand

| Experimentreihe     | $p_{st}^o$ | $p_{st}^h$ | $p_{st}^s$ | $\alpha^h$  | Kassette |
|---------------------|------------|------------|------------|-------------|----------|
| Obere Düse          | 0-5 bar    | 3 bar      | -          | $10^\circ$  | Nein     |
| Position obere Düse | 3 bar      | 3 bar      | -          | $10^\circ$  | Nein     |
| Hintere Düse        | 3 bar      | 1-7 bar    | -          | $10^\circ$  | Nein     |
| Hintere Düse        | 2-4 bar    | 1-7 bar    | -          | $0^\circ$   | Nein     |
| Hintere Düse        | 2-4 bar    | 1-7 bar    | -          | $-10^\circ$ | Nein     |
| Kassette            | 1-5 bar    | 1-7 bar    | -          | $-10^\circ$ | Ja       |
| Seitliche Düsen     | 4 bar      | 6 bar      | 0-9 bar    | $-10^\circ$ | Ja       |



## 5.4 Einfluss der oberen Hohlkegeldüse

Zunächst wird in der ersten Sequenz von Experimenten der Einfluss der oberen Hohlkegeldüse untersucht. Die obere Hohlkegeldüse übernimmt dabei zwei Funktionen. Einmal wird die Waferlage stabilisiert, zum anderen wird die Kraft  $F_x^o$  erzeugt.

Zur Bestimmung eines optimalen Bereiches für den Einsatz der oberen Hohlkegeldüse wird zunächst ein initialer Winkel für die hinteren Flachstrahldüsen von  $10^\circ$  gewählt bei einem Druck von 5 bar. Die Kassette wurde hierbei nicht verwendet. Abbildung 5.9 zeigt die durchschnittliche relative Höhe des Wafers in Abhängigkeit zur Zeit. Durch Erhöhung des Drucks auf die obere Düse mit dem Inkrement 1 bar wird die Kraft  $F_z^o$  des Flüssigkeitsstrahls erhöht und die Höhe des Wafers in Referenz zum unteren Wafer vermindert sich. Gleichzeitig ist gut zu erkennen, dass bei Erhöhung der Kraft  $F_z^o$  die Schwankungsbreite der Lageveränderung des Wafers abnimmt, mithin die Waferlage selbst stabiler wird. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5.9 die Druckwerte mit dargestellt.

Bei einem Druck von 0 bar (Düse nicht in Funktion) schwankt die Waferhöhe um nahezu 1 mm. Größere Ausschläge sind auch bei 1 bar noch gut zu erkennen. Ab 2 bar Druck werden die Schwankungen geringer und verringern sich auch im Folgenden. Die Waferlage wird stabiler.

Aus den beiden Parametern Waferhöhe und Waferstabilität gilt es nun einen optimalen Bereich zu definieren. Dazu werden die Mittelwerte und die Standardabweichung der Waferhöhe ermittelt und mit dem Druck der Düse korreliert. Für die Korrelation wird der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient  $r$  verwendet (siehe auch Bamberg und Baur [1996]):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

mit:

$x_i, y_i$  = Merkmalsausprägungen

$\bar{x}, \bar{y}$  = Mittelwerte der Merkmalsausprägungen

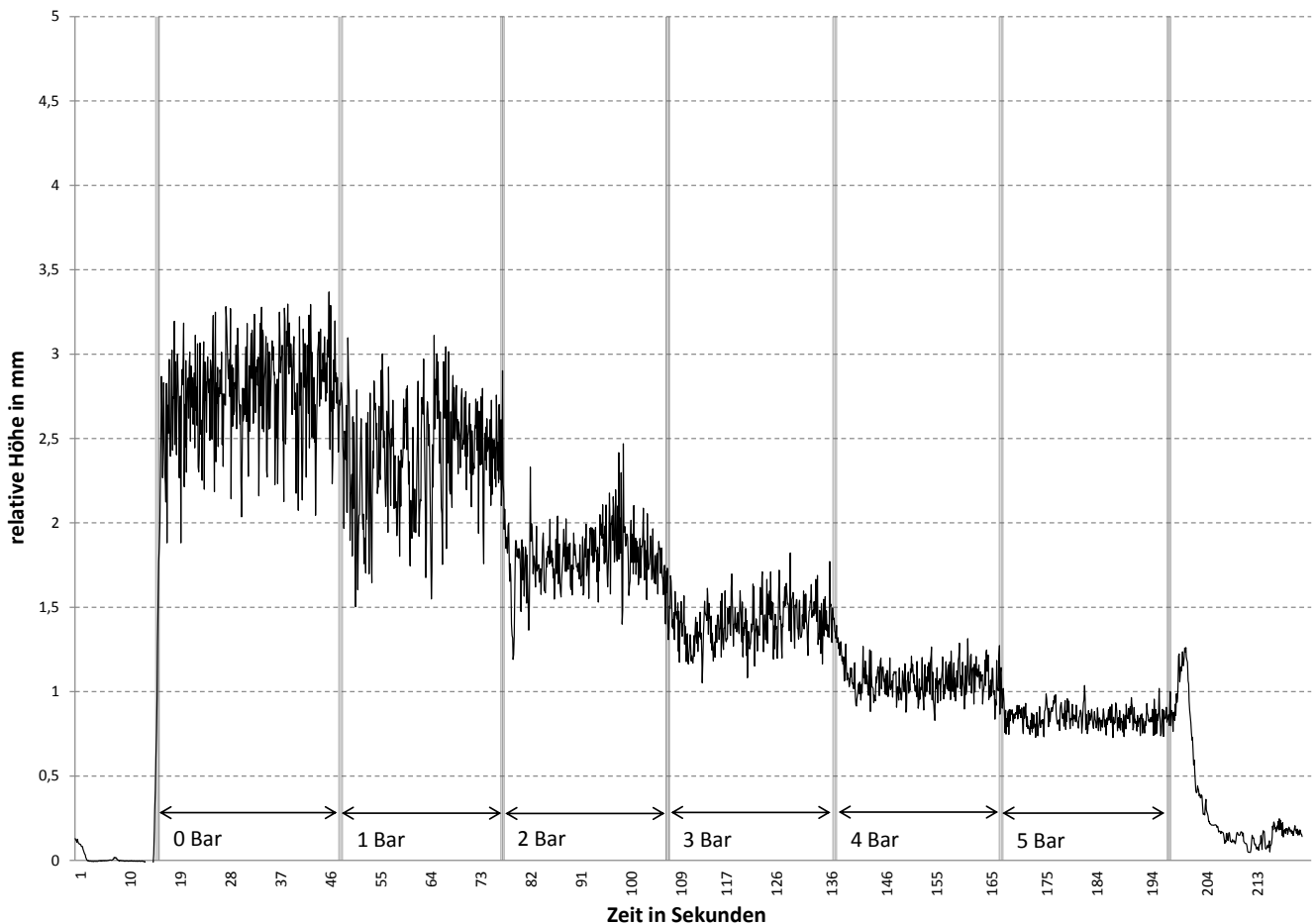


Abbildung 5.9: Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck an der oberen Düse

Dabei nimmt der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient Werte zwischen  $-1 \leq r \leq 1$  ein. Werte nahe bei 1 oder -1 legen eine starke positive oder negative lineare Korrelation nahe. Werte nahe 0 bedeuten sehr schwache oder keine lineare Korrelation.

Der Korrelationskoeffizient für die Mittelwerte der Waferhöhe und des Drucks beträgt -0,989. Diese sind somit stark korreliert. Die lineare Korrelation zwischen Standardabweichung der Waferhöhe und Druck beträgt -0,877 und ist somit etwas schwächer korreliert. Mittelwerte und Standardabweichung sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

Ein Bereich um 3 bar erscheint anhand dieser Analyse als guter Wert, um einerseits die Waferhöhe nicht zu stark zu vermindern und andererseits auch eine stabile Waferlage zu etablieren. Die Verminderung der Schwankungsbreite der Waferhöhe ist vom Übergang von 3 auf 4 bar nicht sonderlich groß, d.h. die Stabilität der Waferlage verbessert sich nicht wesentlich.

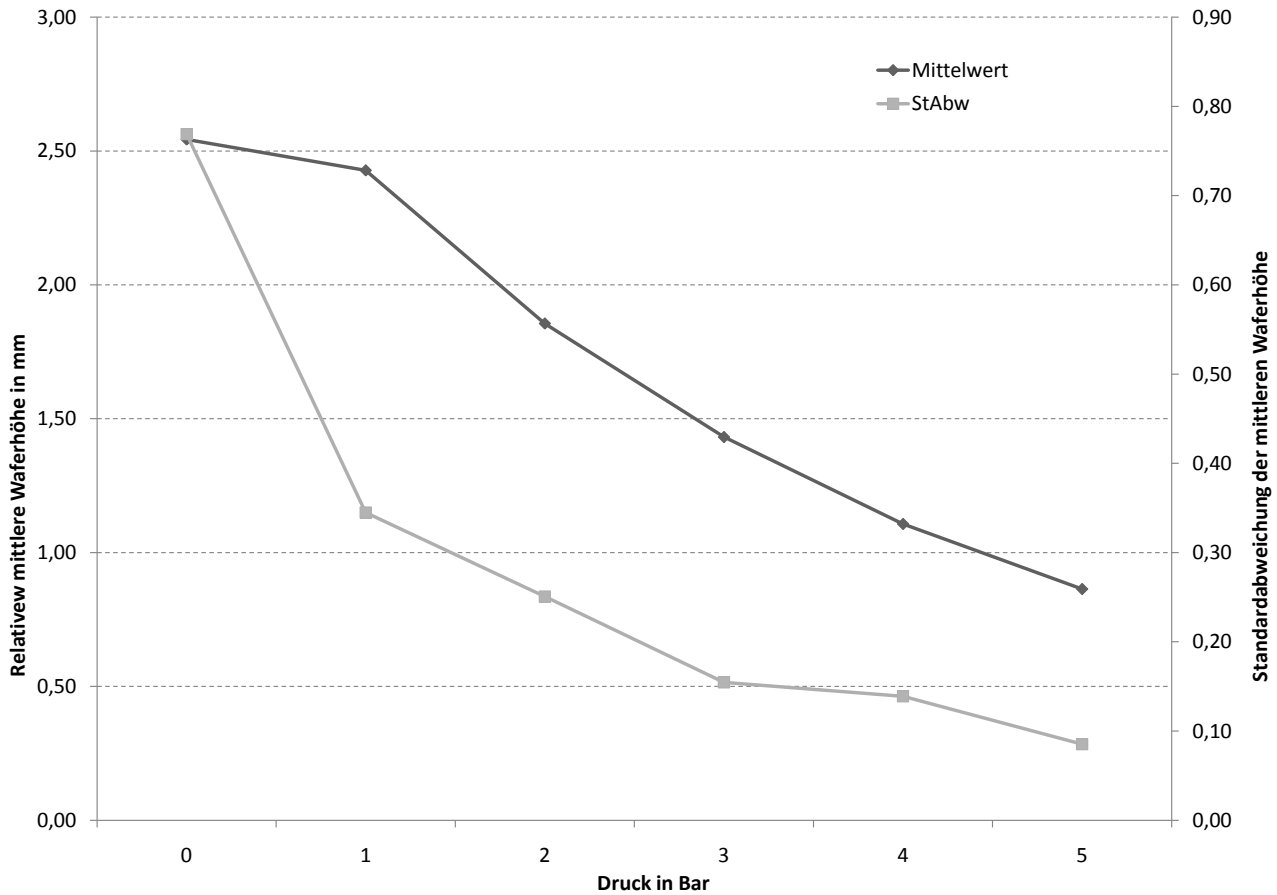


Abbildung 5.10: Mittelwerte und Standardabweichung der Waferhöhe in Abhängigkeit zum Druck der oberen Düse. *Linien zwischen den Werten verdeutlichen den Trend*

### 5.4.1 Einfluss der Düsenposition

Ein weiteres Experiment dient zur Überprüfung des Einflusses der Position der Hohlkegeldüse. Dazu wird die Hohlkegeldüse während eines Versuches in 5 mm-Schritten ab einer Position von 6 cm von der vorderen Waferkante an der Barriere in Richtung der hinteren Flachstrahldüsen verschoben. Als weitere Parameter wurden 3 bar für die obere Hohlkegeldüse und 10° für die hintere Flachstrahldüse gewählt. Dabei ergaben sich für die einzelnen Sensordaten Mittelwerte, welche in Abbildung 5.11 dargestellt sind. Der Einfluss der Düsenposition auf die relative Höhe ist beschränkt. Veränderungen der Höhe liegen im Bereich von unter 0,5 mm. Ein gewisser Trend ist an der vorderen Waferkante (Sensor A und Sensor B) auszumachen. Der Korrelationskoeffizient beträgt dort  $r = 0,961$  für die Werte des Sensors A und  $r = 0,796$  für Sensor B. Bei den hinteren Sensoren ist bei  $r = 0,514$  respektive  $r = 0,307$  kein signifikanter

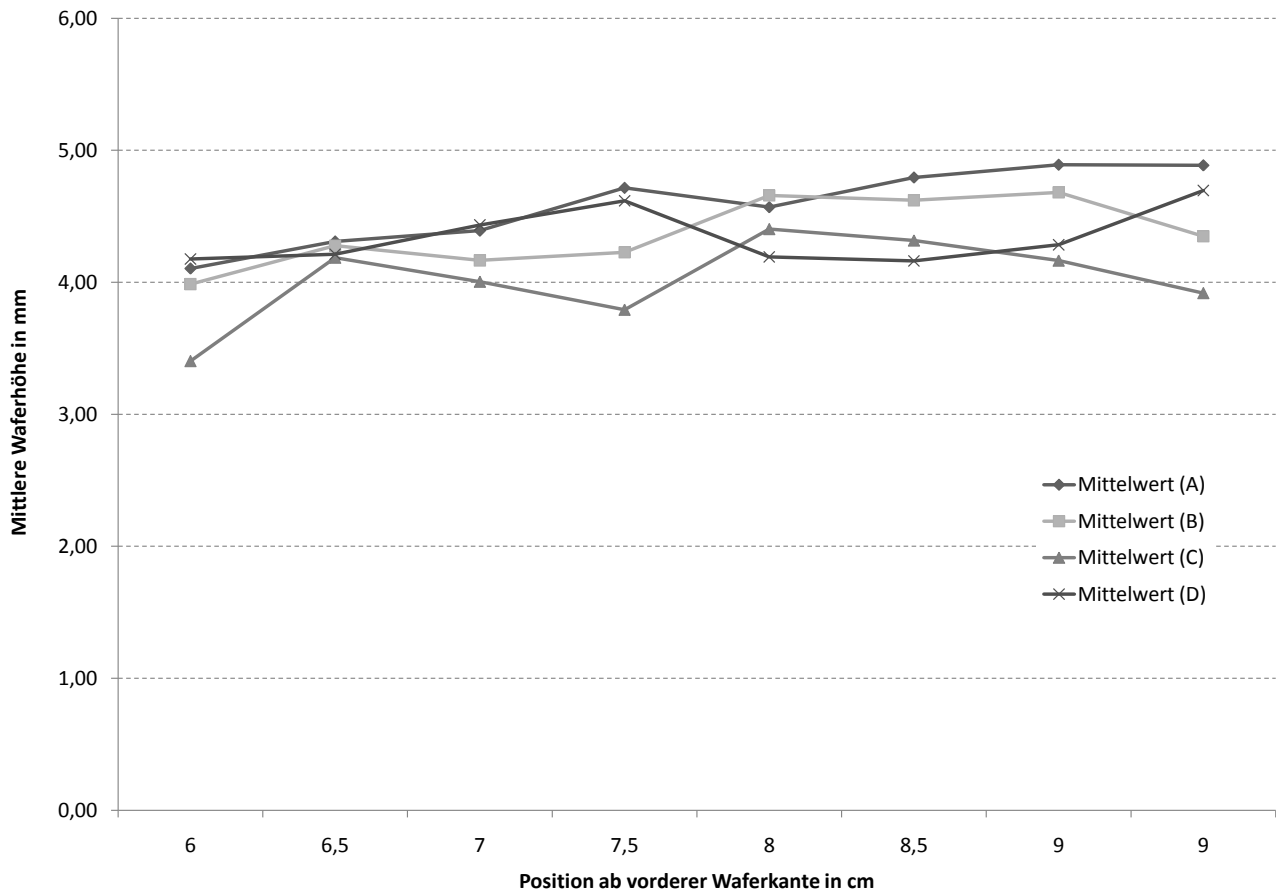


Abbildung 5.11: Mittelwerte der gemessenen Abstände bei Verschiebung der oberen Düsenposition

Trend erkennbar. Bei weiterer Verschiebung der oberen Düse in Richtung der hinteren Flachstrahldüsen tritt der Effekt auf, dass die Kraft  $F_z^o$  die Vereinzelungswirkung der hinteren Flachstrahldüsen zeitweise unterdrückt. Insbesondere bei niedrigeren Drücken der hinteren Flachstrahldüsen ist dies zu beobachten. Aufgrund dieser Effekte wird bei den folgenden Versuchen eine mittige Position der oberen Düse in Bezug zur Waferoberfläche gewählt.

## 5.5 Einfluss der hinteren Flachstrahldüsen

Die hinteren Flachstrahldüsen erfüllen ebenfalls zwei Funktionen (vergleiche Kapitel 4):

1. Vereinzelung der Wafer durch Einbringung der Flüssigkeit zwischen dem obersten und dem darunter liegenden Wafer
2. Erzeugung der Kraft  $F_x^h$  zum initialen Abtransport des vereinzelteten Wafers

Zur Einstellung der oberen Hohlkegeldüse werden die Ergebnisse aus Abschnitt 5.4 verwendet. Der Druck auf diese Düse wird auf 3 bar eingestellt. Die seitlichen Düsen wie auch die Kassette werden zunächst nicht verwendet. Ziel der ersten Untersuchung ist die Einschätzung über den optimalen Winkel für den Angriff der hinteren Düsenleiste.

### 5.5.1 Winkel $\alpha^h > 0$

Im ersten Experiment in dieser Reihe wird der Druck der hinteren Flachstrahldüsen mit dem Inkrement 1 bar von 1 bis 7 bar erhöht. Während des Experiments wurden visuell schon ab einem Druck von 4-5 bar verstärkte Vibrationen (Flattern) des Wafers festgestellt. Dies lässt mit zunehmendem Druck  $p_{st}^h$  etwas nach. Die Fluktuationen der Waferhöhe ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

Gut erkennbar ist die Zunahme der Schwankungsbreite der Waferhöhe, besonders ab einem Druck auf die hinteren Flachstrahldüsen ab 4 bar. Die mittlere Standardabweichung des Wafersegments an der Barriere (Sensoren A+B) steigt bei Erhöhung des Drucks  $p_{st}^h$  von 0,09 auf 0,23 und fällt dann wieder auf 0,16. Beim Wafersegment an den hinteren Flachstrahldüsen (Sensoren C+D) steigt die Standardabweichung von 0,11 auf 0,25 und fällt dann wieder leicht auf 0,24. Die durchschnittlich erreichte maximale relative Waferhöhe liegt bei 1,92 mm für die Sensoren A+B und 2,69 mm für die Sensoren C+D.

Der vermutete Effekt aus Kapitel 4, dass der untere Wafer durch die hinteren Flachstrahldüsen zurückgehalten wird, konnte im Versuch nicht verifiziert werden. Die Mittelwerte der Waferhöhen sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Auffällig ist auch ein negativer Nickwinkel  $\beta^y$  von durchschnittlich  $-0,21^\circ$ . Damit liegt die Waferkante a an der Barriere niedriger als die Waferkante c.

In den folgenden Experimenten wird der Winkel  $\alpha^h$  weiter im positiven Bereich variiert. Bei einem Winkel von  $\alpha^h = 20^\circ$  ist eine Vereinzelungswirkung nicht zuverlässig erzielbar, da die Anströmung einen Flüssigkeitseintrag zwischen den Wafers nicht immer ermöglicht.

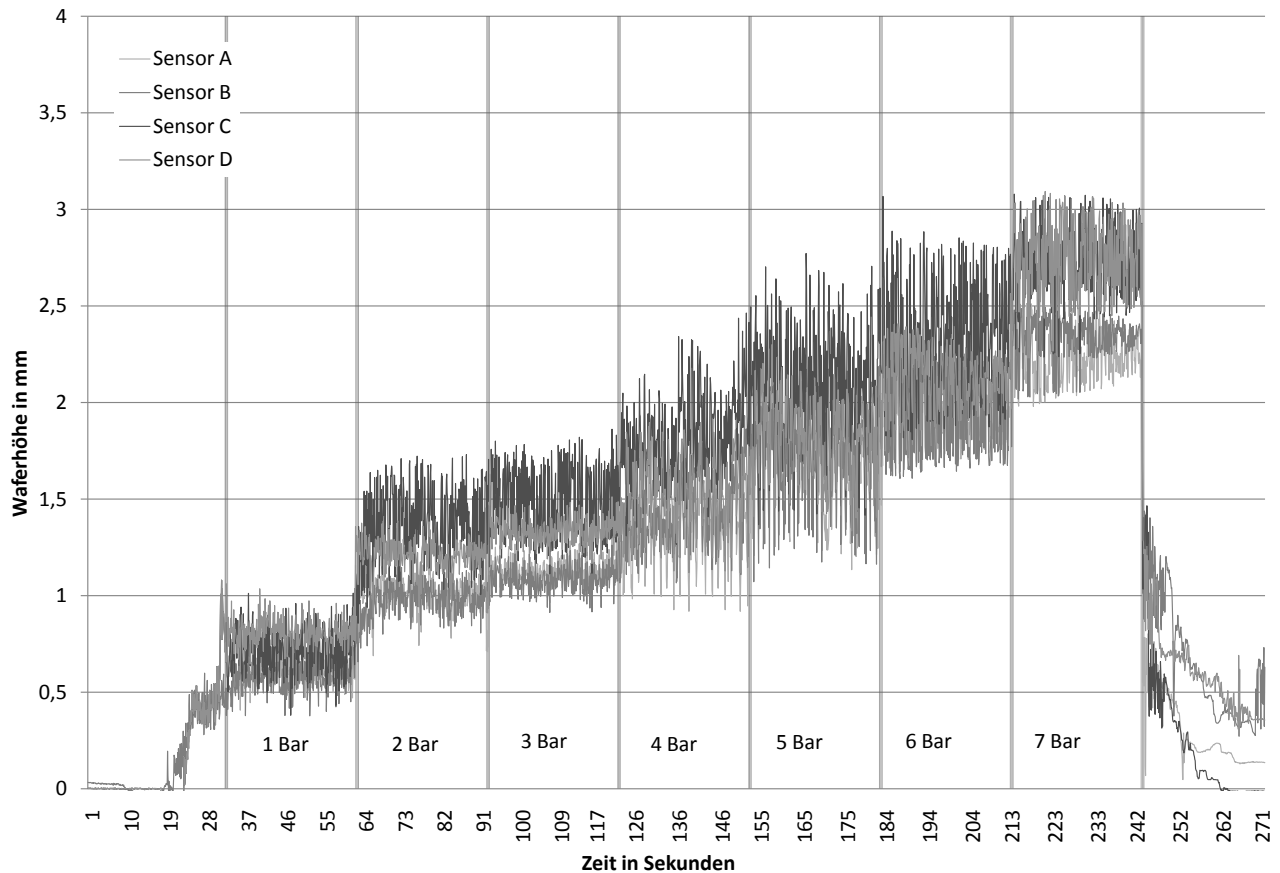


Abbildung 5.12: Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = 10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 3 \text{ bar}$ ,  $p_{st}^h = 1-7 \text{ bar}$

Bei  $\alpha^h = 5^\circ$  kann eine gute Vereinzelungswirkung erreicht werden. Die Vibrationen des Wafers vergrößern sich bei Steigerung des Drucks auf die hinteren Flachstrahldüsen nicht überproportional, wie bei einem Winkel  $\alpha^h$  von  $10^\circ$ . Auffällig ist jedoch bei allen Experimenten ein negativer Nickwinkel  $\beta^y$ , so dass der Wafer an der Barriere eine relativ geringere Höhe aufweist als an der hinteren Waferkante. Die Ursache für dieses Phänomen kann nicht zweifelsfrei geklärt werden. Vermutet werden zwei Ursachen für diesen Effekt, die Strahlgeometrie und die Kraft  $F_z^o$  der oberen Hohlkegeldüse. Die Strahlgeometrie ist keilförmig, d.h. mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt weitet sich der Strahl nicht nur in der Breite, sondern auch in der Dicke auf. Bei erfolgter Vereinzelung wird der Wafer bei einem positivem Winkel  $\alpha^h$  daher vom außenliegenden Teil des Wasserstrahls nach oben gedrückt. Zum anderen kann die Kraft  $F_z^o$  die Volumenkraft  $F_z^v$  im vorderen Bereich des Wafers so reduzieren, dass ein ungenügendes Volumen  $V_w$  in diesem Bereich für den negativen Nickwinkel sorgt.

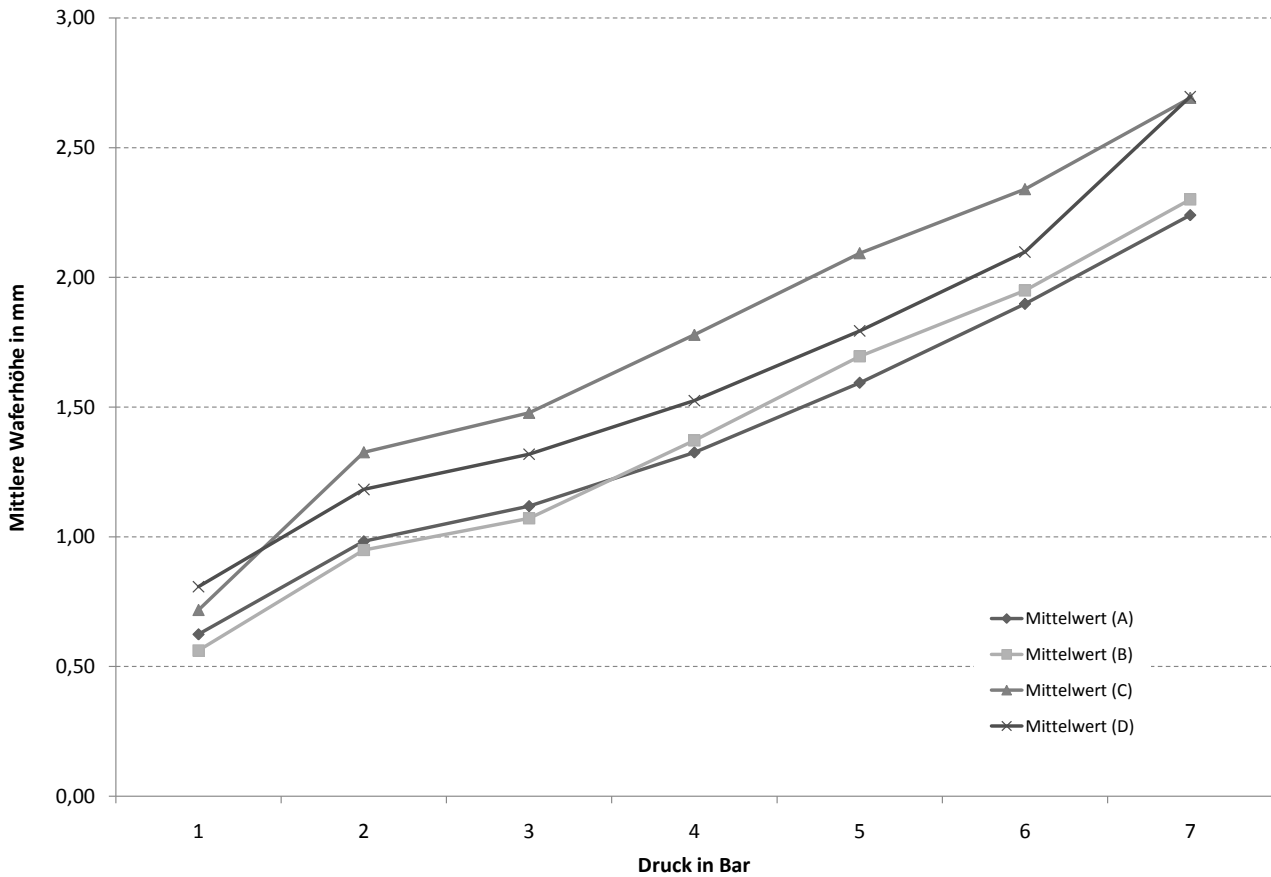


Abbildung 5.13: Mittlere relative Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = 10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 3 \text{ bar}$ ,  $p_{st}^h = 1-7 \text{ bar}$

### 5.5.2 Winkel $\alpha^h = 0$

In Kapitel 4 wurde die These einer guten Vereinzelungswirkung bei einem Winkel der hinteren Düsenleiste von  $0^\circ$  aufgestellt. Experimentell lässt sich dies nicht bestätigen, da bei dieser Einstellung die Wahrscheinlichkeit ansteigt, doppelte Wafer zu erfassen. Die Ursache liegt darin, dass der Flüssigkeitsstrahl mittig zwischen den obersten beiden Wafern angreifen muss, um diese zu trennen. Dadurch kann der untere Wafer durch die Randbereiche des Flüssigkeitsstrahls mit erfasst werden. Bei einer Justierung des Flüssigkeitsstrahls oberhalb des Spaltes zwischen den Wafern kann es zu einer unzureichenden Vereinzelung kommen. Grund dafür ist die im Vergleich zur Waferdicke größere Strahldicke.

Es wurden Versuche jeweils mit einem Druck der oberen Düse von 2,3 und 4 bar gemacht, wobei der Druck der hinteren Düsenleiste von 1 auf 7 bar erhöht wurde. Exemplarisch ist dies in Abbildung 5.14 dargestellt.

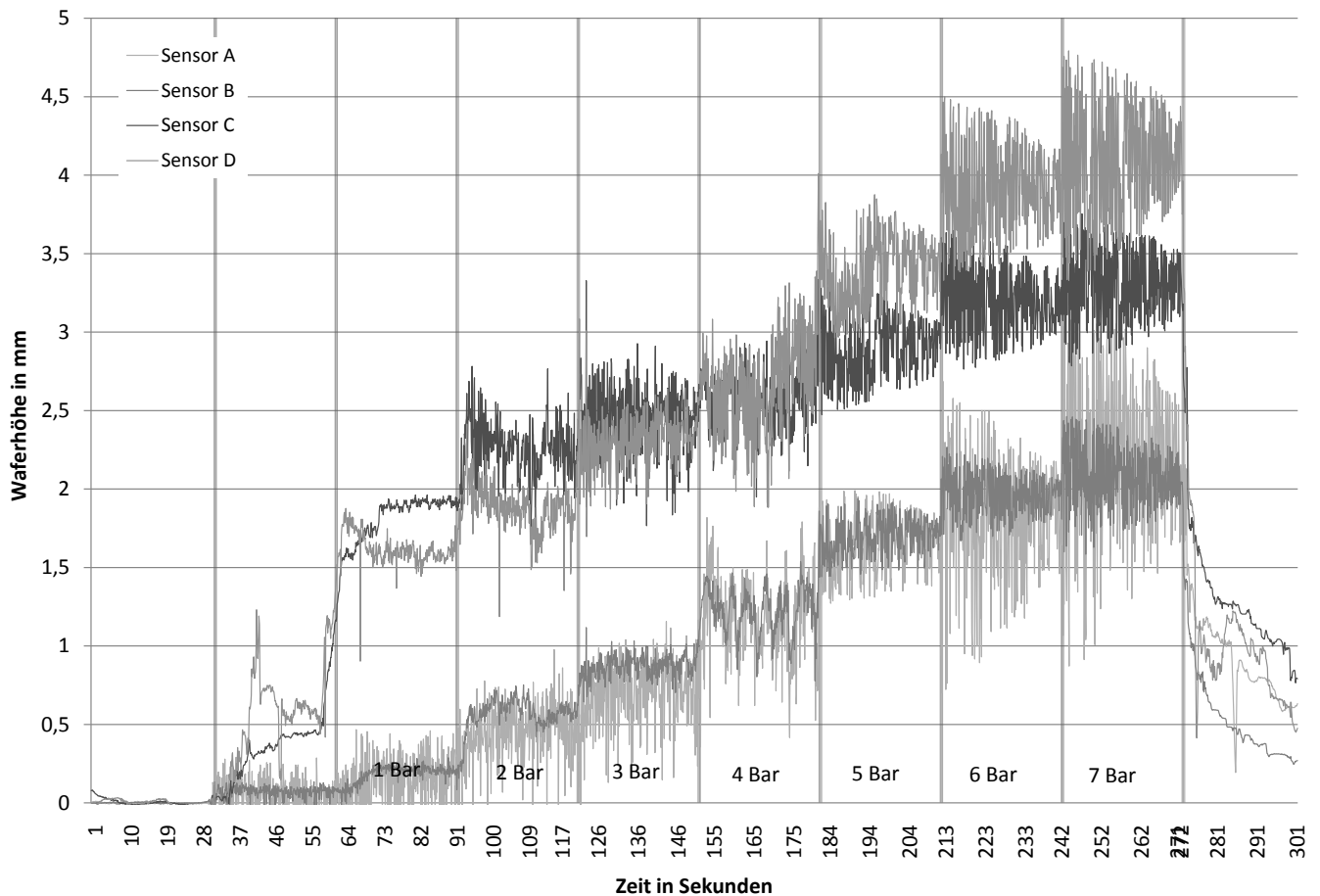


Abbildung 5.14: Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = 0^\circ$ ,  $p_{st}^o = 3$  bar,  $p_{st}^h = 1-7$  bar

Deutlich zu sehen sind starke Vibrationen, die bei 6 bar beginnen und sich bei 7 bar weiter verstärken. Die Standardabweichung der Waferhöhe steigt von 0,1 auf 0,35 für den vorderen Waferbereich, während sie für den hinteren Bereich stets größer als 0,2 ist und bei  $p_{st}^h = 7$  bar bei 0,29 liegt.

Weiterhin erhöht sich die relative Waferhöhe stärker an der hinteren Waferkante (Sensoren C und D). Dies führt dazu, dass der Wafer in Richtung der Barriere nach vorne geneigt ist, entsprechend entsteht ein negativer Nickwinkel  $\beta^y$ . Dies wurde in allen Experimenten mit  $\alpha^h = 0$  beobachtet. Nachfolgend sind die Ergebnisse als Durchschnitt in Tabelle 5.5 dargestellt.



Tabelle 5.5: Mittelwerte der relativen Höhe der vorderen und hinteren Waferkante bei  $\alpha^h = 0^\circ$ ,  $p_{st}^o = 2-4$  bar,  $p_{st}^h = 1-7$  bar

|            | Obere Düse |          |          |          |          |          |
|------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            | 2 bar      |          | 3 bar    |          | 4 bar    |          |
| Hint. Düse | MW (A+B)   | MW (C+D) | MW (A+B) | MW (C+D) | MW (A+B) | MW (C+D) |
| 1 bar      | 0,20       | 0,01     | 0,05     | 0,37     | 0,04     | 0,15     |
| 2 bar      | 0,32       | 1,06     | 0,14     | 1,65     | 0,09     | 0,66     |
| 3 bar      | 0,80       | 2,77     | 0,48     | 2,04     | 0,12     | 0,69     |
| 4 bar      | 1,02       | 3,08     | 0,76     | 2,35     | 0,33     | 1,19     |
| 5 bar      | 1,45       | 3,23     | 1,17     | 2,59     | 0,72     | 1,89     |
| 6 bar      | 1,69       | 3,64     | 1,64     | 3,12     | 1,01     | 1,93     |
| 7 bar      | 2,04       | 3,85     | 1,88     | 3,54     | 1,36     | 1,88     |

Ursache des beschriebenen Effektes ist ein erhöhter Eintrag des Wassers in den Waferspalt, da dieser parallel zu den Waferoberflächen erfolgt. Das unter dem Wafer befindliche Wasservolumen  $V_w$  wird dadurch in Richtung der Barriere geschoben. Dort kann es an den Waferkanten a und b abfließen. Das nachströmende Wasser staut sich dergestalt auf, dass der Druckmittelpunkt näher an der Waferkante c liegt. Dadurch entsteht der negative Nickwinkel.

### 5.5.3 Winkel $\alpha^h < 0$

Bei negativem Winkel für  $\alpha^h$  wird der zu vereinzelnde Wafer schräg von unten angeströmt. In dieser Einstellung wird die stabilste Waferlage erreicht. Die Ursache liegt in der verbesserten Kompensation der Kraft  $F_z^o$  durch die direkte Anströmung der Waferunterseite. Dadurch werden die Schwankungen des Volumens  $V_w$  und die damit einhergehenden Schwankungen der Kraft  $F_z^v$  zu einem gewissen Teil kompensiert. Die direkte Anströmung der Waferunterseite und die damit induzierte Kraft  $F_z^h$  wirkt als dämpfendes Element. Damit sinkt auch die beobachtete Vibration des vereinzelteten Wafers. Bei  $p_{st}^h = 3$  bar liegt die Standardabweichung der Waferhöhe im Bereich von 0,08-0,17 für das Wafersegment an der Barriere und 0,08-0,12 für das hintere Wafersegment. Die mittlere Waferhöhe ist in Abbildung 5.15 für  $p_{st}^o = 3$  bar exemplarisch dargestellt. Der Nickwinkel  $\beta^y$  ist wie schon bei den anderen bisher diskutierten Experimenten negativ und vermindert sich bei zunehmendem Druck  $p_{st}^h$  von anfangs  $-0,34^\circ$  auf  $-0,13^\circ$ .

Der Wafer wird bei erfolgter Vereinzelung voll durch den Flüssigkeitsstrahl erfasst. Dies ist in Abbildung 5.17 gut zu erkennen. Die Waferhöhe nivelliert sich mit zunehmendem Druck und liegt bei 1-2 mm bei  $p_{st}^h = 7$  bar. Die Nivellierung der mittleren Waferhöhe bei verschiedenen Drücken  $p_{st}^o$  ist in Abbildung 5.16 zu sehen. Eine Zunahme des Drucks  $p_{st}^o$  wirkt sich mindernd auf die relative Waferhöhe aus (wie in Abschnitt 5.4 beschrieben).

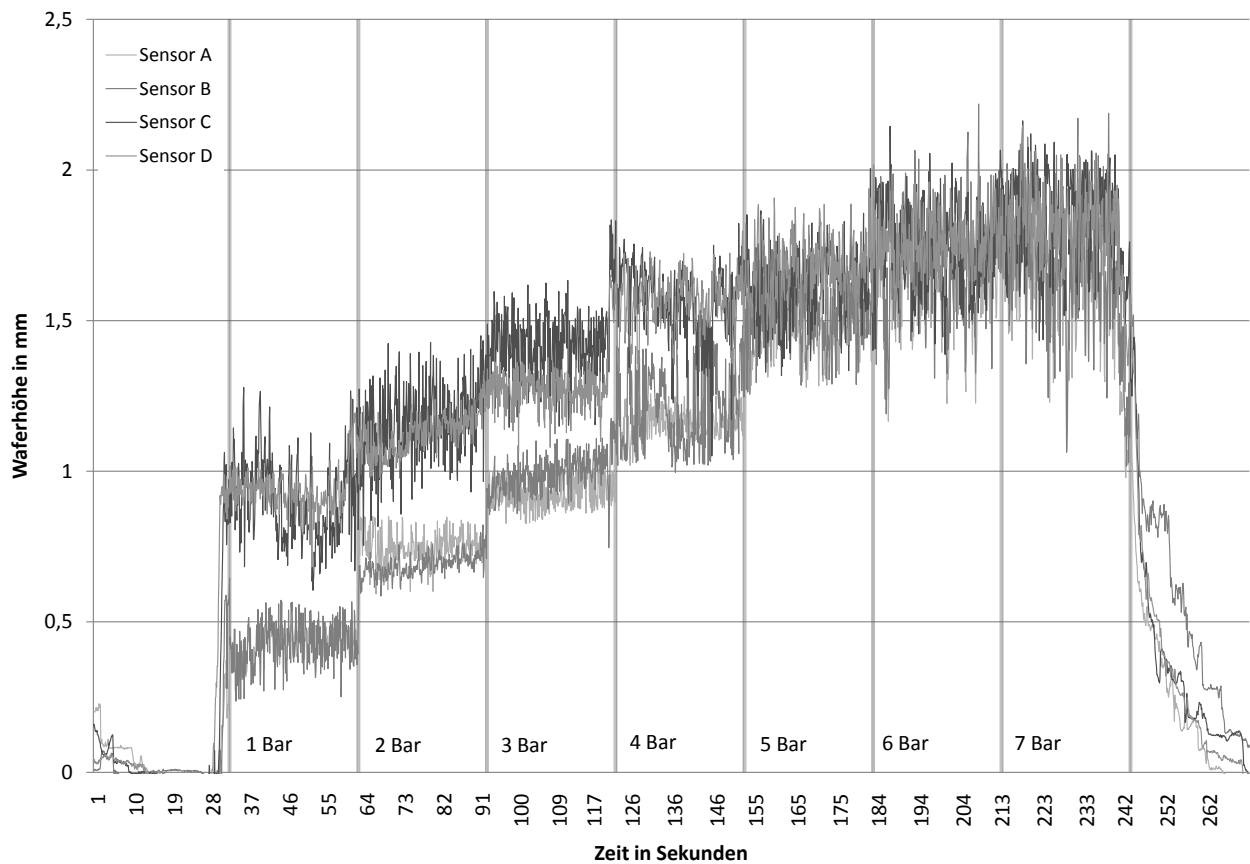


Abbildung 5.15: Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 3 \text{ bar}$ ,  $p_{st}^h = 1-7 \text{ bar}$

Bei einem Anströmwinkel von  $\alpha^h = -20^\circ$  kann dauerhaft keine Vereinzlung erzielt werden, da der Wafer schon ab einem Druck von  $p_{st}^h = 3 \text{ bar}$  zerbrechen kann. Mit keinem Wafer konnte eine Vereinzlung erzielt werden, ohne dass es zu Beschädigungen kam. Grund dafür sind die größeren Kräfte bei größerem Winkel. Die hintere Düsenleiste erzeugt dabei nach Gleichung (4.16) eine Kraft  $F_z^h$  zwischen 0,0679 und 0,524 Newton (bei statischem Druck von 1-7 bar). Diese Kraft greift direkt an der Waferkante an. Die Kraft  $F_z^o$  kompensiert diese Kraft im Bereich der Wafermitte. Dadurch entsteht ein Hebel von 5-7 cm (durch die Kreisform der Hohlkegeldüse). Das dabei entstehende Biegemoment erhöht die Bruchgefahr für den Wafer, da dieser sich aufgrund der geringen Elastizität des Materials nicht verformen kann.

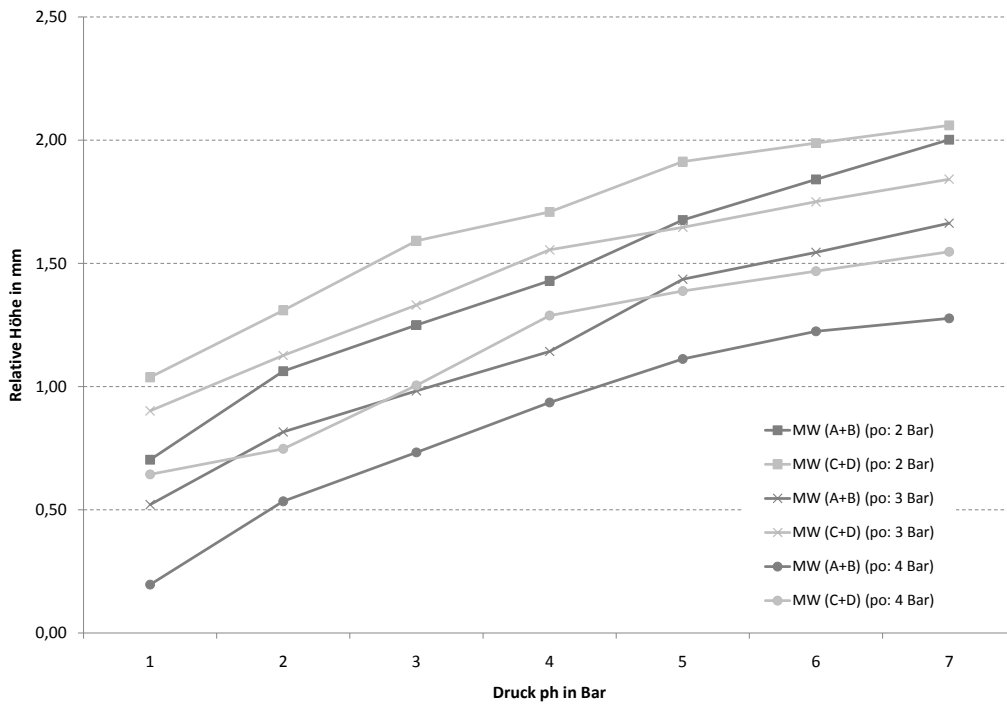


Abbildung 5.16: Mittelwerte der relativen Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 2-4$  bar,  $p_{st}^h = 1-7$  bar

Ein Winkel von  $\alpha^h = -5^\circ$  erzielt eine gute Vereinzlungswirkung jedoch sind die Schwankungen in Form der Standardabweichung der relativen Waferhöhe größer als bei einem Winkel  $\alpha^h = -10^\circ$ . Sie liegen bei Drücken von  $p_{st}^o = 2-4$  bar bei 0,2-0,3 im vorderen Wafersegment an der Barriere und 0,3-0,4 im hinteren Wafersegment.

Die vertikale Kraft durch die Flachstrahldüsen erreicht bei  $\alpha^h = -10^\circ$   $F_z^h = 0,0345$  N bis  $F_z^h = 0,266$  N. Dies ist deutlich geringer als die kritische Kraft bei  $\alpha^h = -20^\circ$ .

#### 5.5.4 Zusammenfassung der Untersuchung zum Winkel $\alpha^h$

Die besten Ergebnisse der Vereinzlung wurden mit einem negativen Winkel  $\alpha^h$  im Bereich von  $-10^\circ$  erzielt. Das Vereinzlungsergebnis ist gut bei gleichzeitig geringster Fluktuation der Waferhöhe (abgebildet durch die Standardabweichung). Die größte Waferhöhe ist mit einem Winkel  $\alpha^h = 0$  erzielbar, hervorgerufen durch den optimalen Eintrag des Wassers in den Waferspalt.



Abbildung 5.17: Wafer mit Anströmung aus einem Winkel von  $\alpha^h = -10^\circ$

Unvorteilhaft für den späteren Abtransport der Wafer wirkt sich jedoch der negative Nickwinkel  $\beta^y$  bei allen Experimenten aus (siehe Kapitel 6). Daher wird in den folgenden Experimenten die Kassette verwendet.

### 5.5.5 Einsatz der Kassette

Zunächst soll durch den Einsatz der Kassette untersucht werden, wie sich das Volumen  $V_w$  unterhalb des vereinzelt Wafer ändert. Dies dient der Überprüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Vermutung, durch Einschränkung des ablaufenden Volumens  $V_b$  die relative Waferhöhe vergrößern zu können. Diese Vermutung lässt sich experimentell bestätigen. Bei allen Experimenten liegt die relative Waferhöhe bei einem maximalen Druck von  $p_{st}^h = 7$  bar im Bereich von 5 mm an der Waferkante a und um ca. 3 mm für die Waferkante c an den Flachstrahldüsen (siehe Abbildung 5.18).

Gut zu erkennen ist die vergrößerte relative Waferhöhe, insbesondere an der Barriere. Tendenziell sinkt die relative Waferhöhe mit Erhöhung des Drucks  $p_{st}^o$ . Jedoch ist dies nicht so eindeutig wie ohne Einsatz der Kassette (siehe Abbildung 5.16). Teilweise ist die relative Waferhöhe bei größeren Drücken  $p_{st}^o$  geringer

als bei niedrigeren Drücken  $p_{st}^o$ . Dies ist insbesondere am Wafersegment bei den Flachstrahldüsen zu beobachten. Erst bei Drücken  $p_{st}^o > 3$  bar vermindert sich die Waferhöhe merklich. Die Reduktion des abfließenden Volumens  $V_b$  hat einen positiven Einfluss auf die Waferhöhe.

Weiterhin ist anhand der Sensordaten die Waferlage zu ermitteln. Bei Einsatz der Kassette erreicht der Wafer an der Barriere eine höhere Position als auf der abgewandten Seite. Der Nickwinkel  $\beta_y$  vergrößert sich und liegt bei  $p_{st}^h = 7$  bar im Bereich von  $1,2 - 1,4^\circ$ . Auch der Rollwinkel  $\beta_x$  vergrößert sich und liegt typischerweise im Bereich von  $0,5 - 1^\circ$ . Ein Rollwinkel ist für den Abtransport der Wafer ungünstig, da der Wafer beim Übergang über die Barriere die Ausrichtung verlieren könnte.

Bei allen Experimenten mit Kassette ist dabei eine Zunahme der Vibrationen des Wafers zu verzeichnen. Dabei stabilisiert sich das hintere Wafersegment mit steigendem Druck  $p_{st}^h$ , während das vordere Wafersegment bei allen verwendeten Drücken  $p_{st}^o$  keine signifikante Tendenz aufweist (siehe Abbildung 5.19). Die steigende Kraft  $F_z^h$  stabilisiert das Wafersegment an den Flachstrahldüsen. Die Standardabweichung der mittleren Waferhöhe ist teilweise doppelt so groß wie bei den Experimenten mit  $\alpha^h = -10^\circ$  ohne Kassette.

### 5.6 Einsatz der seitlichen Düsenstrahlen

Beim Einsatz der seitlichen Düsenstrahlen entstehen gegenläufige Kräfte in Richtung der y-Achse. Da sich die Kräfte nicht vollständig aufheben, wird im Regelfall eine resultierende Kraft  $\Delta F_y^s$  entstehen. Diese würde den Wafer entlang der y-Richtung verschieben. Zur Kompensation müssen entsprechende Führungen oder eine Kassette eingesetzt werden.

In den Versuchen wurde die Kassette verwendet, wobei diese mit Aussparungen für die seitlichen Düsen versehen ist. Besondere Aufmerksamkeit muss auf die genaue Einstellung der Höhe der seitlichen Düsen gelegt werden, da es ansonsten zu einer Ausbildung eines größeren Rollwinkels des Wafers kommen kann. Bei genauer Einstellung der Düsen ist eine Stabilisierung der Waferlage erzielbar, die auch zu einem positiven Nickwinkel  $\beta_y$  führt. Ein Versuch mit Steigerung des Drucks auf die seitlichen Düsen ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Dort ist exemplarisch der Rollwinkel, bzw. die Verwindung des Wafers zu sehen.

Deutlich zu sehen ist auch eine Stabilisierung der Waferlage ab einem Druck  $p_{st}^s$  von 6 bar. Der Winkel  $\beta_y$  beträgt  $0,69^\circ$  bei 1 bar Druck der seitlichen Düsen und  $1,71^\circ$  bei 9 bar. Der Rollwinkel  $\beta_x$  hat sein Maximum bei 2 bar ( $0,82^\circ$ ) und nimmt kontinuierlich auf  $0,05^\circ$  bei 9 bar ab.

Die maximale relative Waferhöhe beträgt 6 mm für das hintere Wafersegment an der Barriere und 3,5 mm für das vordere Segment. Dies stellt die bisher größte erreichte relative Waferhöhe dar. Die durchschnittliche Standardabweichung steigt leicht an und erreicht bei  $p_{st}^s = 4$  bar 0,3 für das vordere und 0,4 für das hintere Wafersegment. Danach nimmt die Standardabweichung auf 0,17 respektive 0,25 für das hintere Wafersegment ab.

Bei nicht hinreichend genauer Einstellung der Höhe der seitlichen Düsen kann es auch zur Erhöhung des Rollwinkels  $\beta_y$  kommen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 5.21 dargestellt. Deutlich sind die unterschiedlichen Waferhöhen an den Sensoren A und B, bzw. C und D zu sehen. Dies führt zu einem Rollwinkel  $\beta_y$  von  $\pm 0,3^\circ$  ab 4 bar Druck.

### 5.6.1 Detailbetrachtung der Fluktuation der Waferhöhe

Die Fluktuationen der Waferhöhe sind für die Vereinzelung von Bedeutung, da dadurch der Übergang des Wafers über die Barriere beeinflusst wird. In Abbildung 5.22 ist ein typisches Bild der Fluktuationen in einer Detailbetrachtung abgebildet. Der Mittelwert der relativen Waferhöhe beträgt 1,695 mm und die Standardabweichung 0,2386. Damit hat der Variationskoeffizient den Wert 0,14. Der Variationskoeffizient der Kraft der Flachstrahldüse beträgt 0,0059. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass die Fluktuationen der Kräfte der Wasserstrahlen nicht die Hauptursache für die Fluktuationen der Waferhöhe sind. Daher dürfte die Hauptursache für diesen Effekt die Reibung der Waferkanten an der Barriere und den Seitenführungen sein. Der Abfluss des Wassers unterhalb des Wafers wird dadurch stärker beeinflusst, was die Fluktuationen hervorruft.

## 5.7 Zusammenfassung

Die Experimente haben gezeigt, dass die Waferlage in der statischen Betrachtung ohne Abtransport des Wafers stark von den verwendeten Parametern abhängt. Insbesondere der Anstellwinkel  $\alpha^h$  und die Verwendung der Kassette haben einen wesentlichen Einfluss auf das Vereinzelungsergebnis. Zunehmender Druck auf die Hohlkegeldüse wirkt sich dämpfend auf die Vibrationen des Wafers aus, verringert jedoch auch die relative Waferhöhe. Zunehmender Druck auf die Flachstrahldüsen erhöht in der Regel die absolute Waferhöhe. Jedoch muss dabei die Kraft  $F_z^h$  betrachtet werden, da diese bei zu hohen Drücken zu Waferbruch führen kann. Die seitlichen Düsen können die relative Waferhöhe vergrößern. Dabei ist

die Realisierung einer stabilen Waferlage jedoch schwieriger. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Winkel  $\alpha^h = -10^\circ$  erzielt. Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung des Verfahrens in einem Prototypen beschrieben.

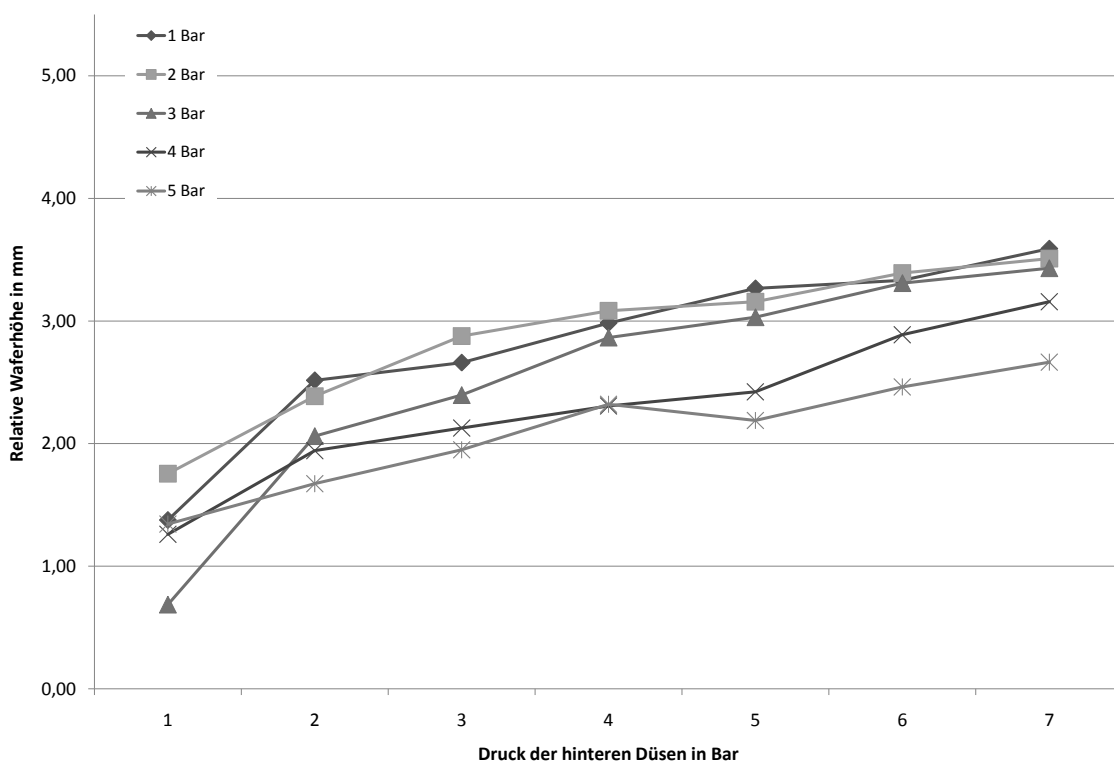
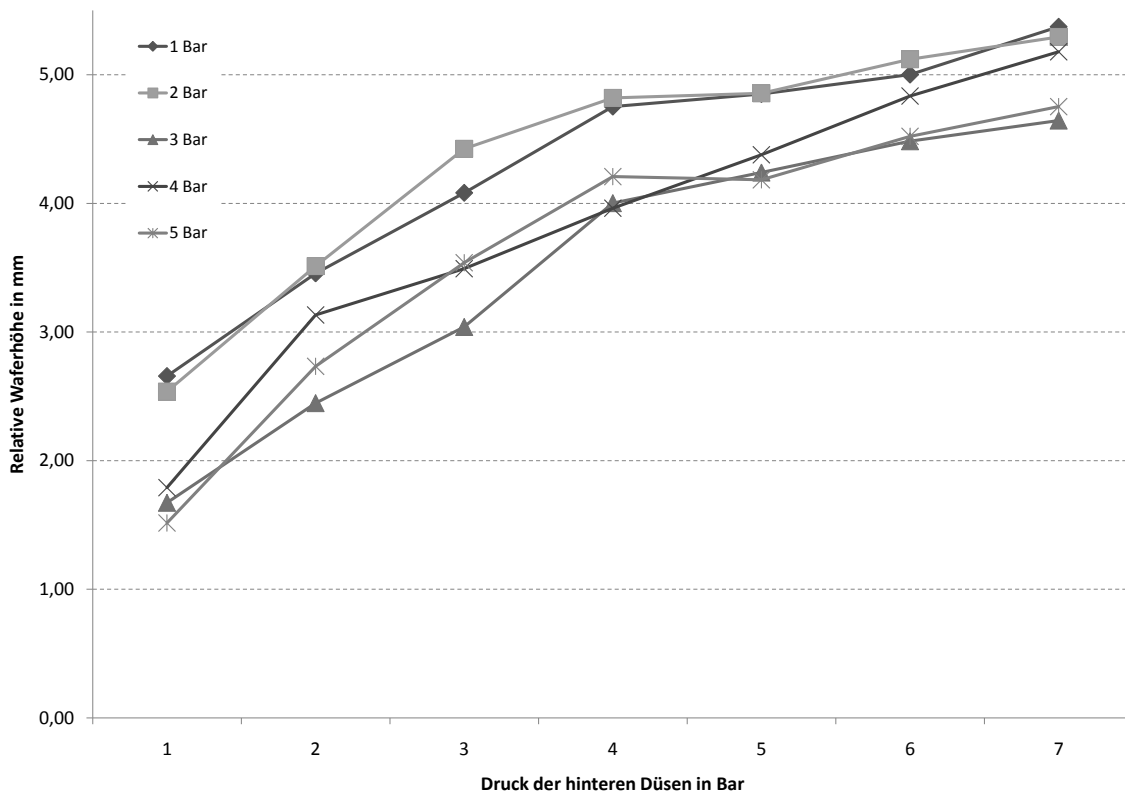


Abbildung 5.18: Mittlere relative Waferhöhe bei den Sensoren A und B (obere Graphik), sowie C und D (untere Graphik) bei verschiedenen Drücken  $p_{st}^o$  in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 1-5$  bar,  $p_{st}^h = 1-7$  bar unter Einsatz der Kasette



## 5 Experimentelle Analyse des Modells

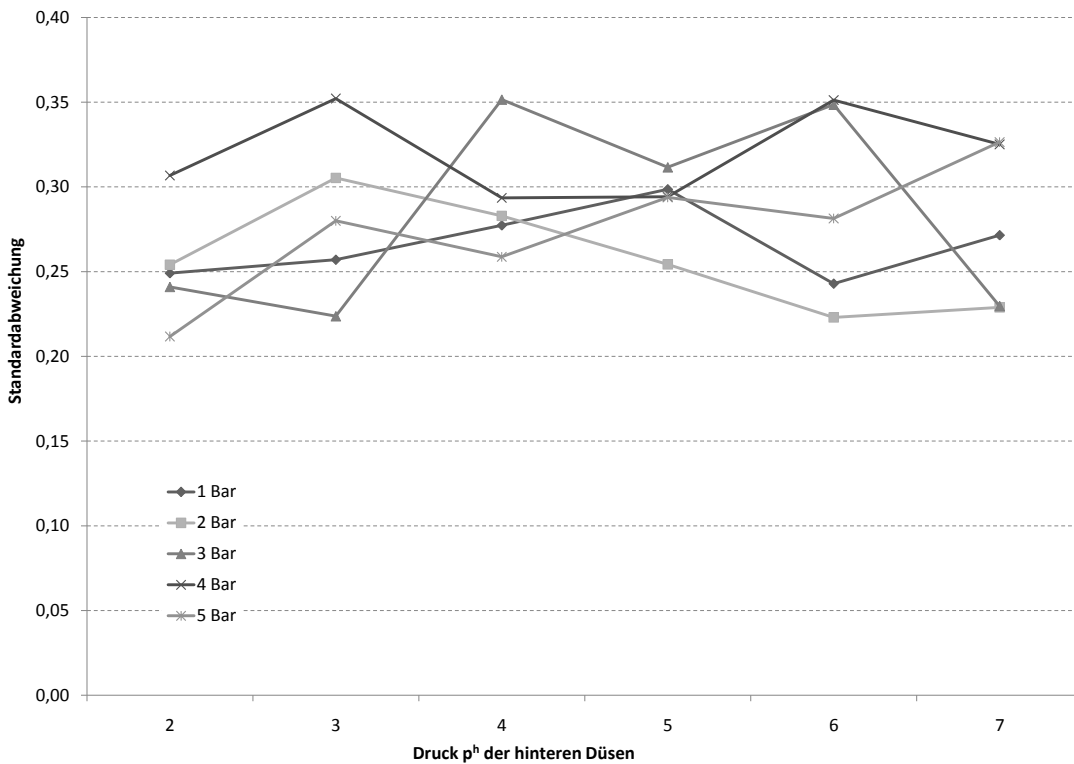
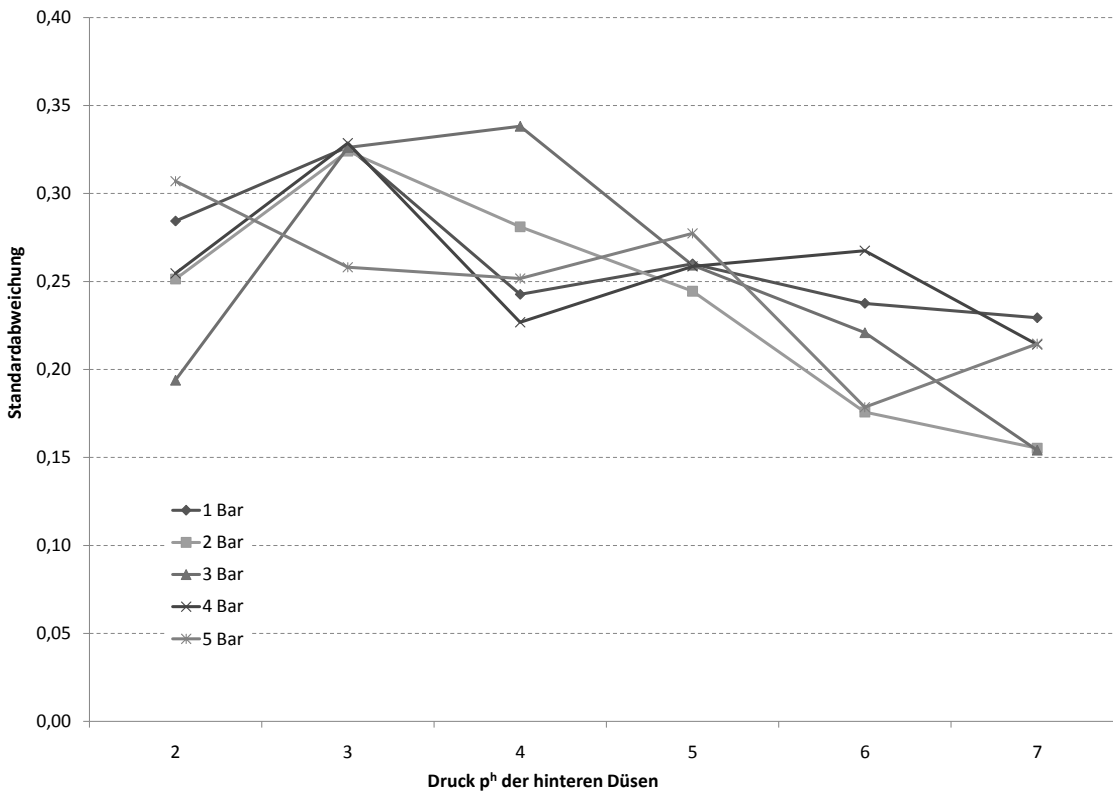


Abbildung 5.19: Standardabweichung der relativen Waferhöhe bei den Sensoren A und B (obere Graphik), sowie C und D (untere Graphik) bei verschiedenen Drücken  $p_{st}^o$  in Bezug zu zunehmendem Druck der hinteren Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 1-5$  bar,  $p_{st}^h = 1-7$  bar unter Einsatz der Kassette

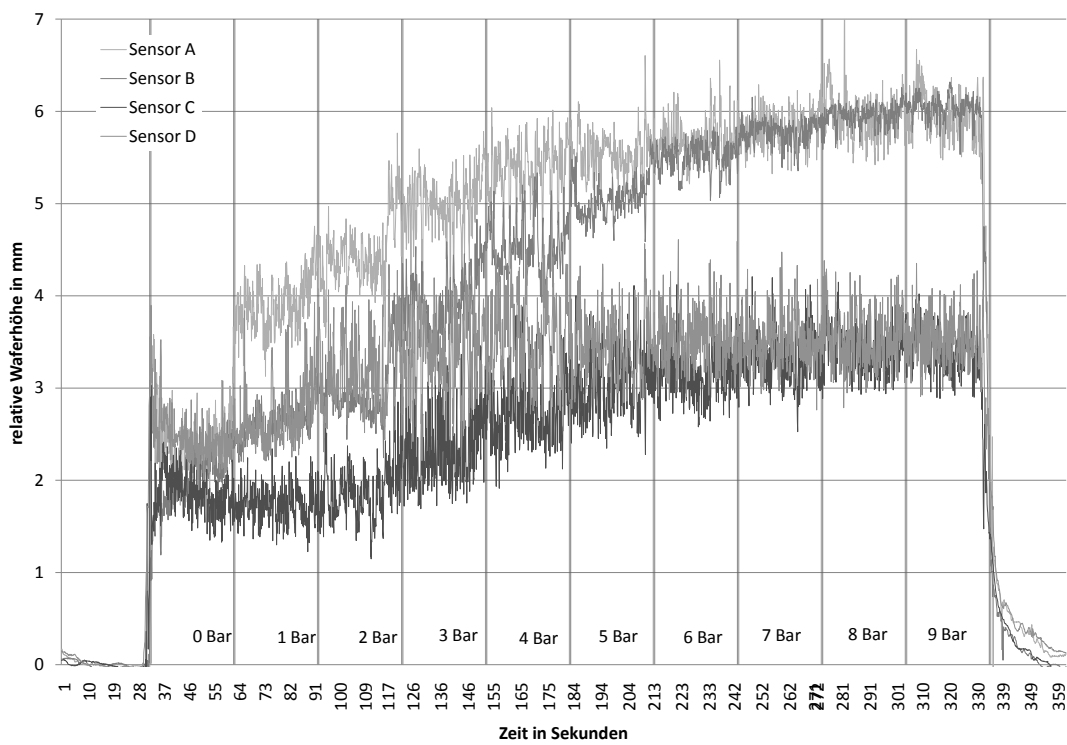


Abbildung 5.20: Waferhöhe in Bezug zu zunehmendem Druck der seitlichen Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 4$  bar,  $p_{st}^h = 6$  bar,  $p_{st}^s = 0-9$  bar bei Einsatz der Kasette

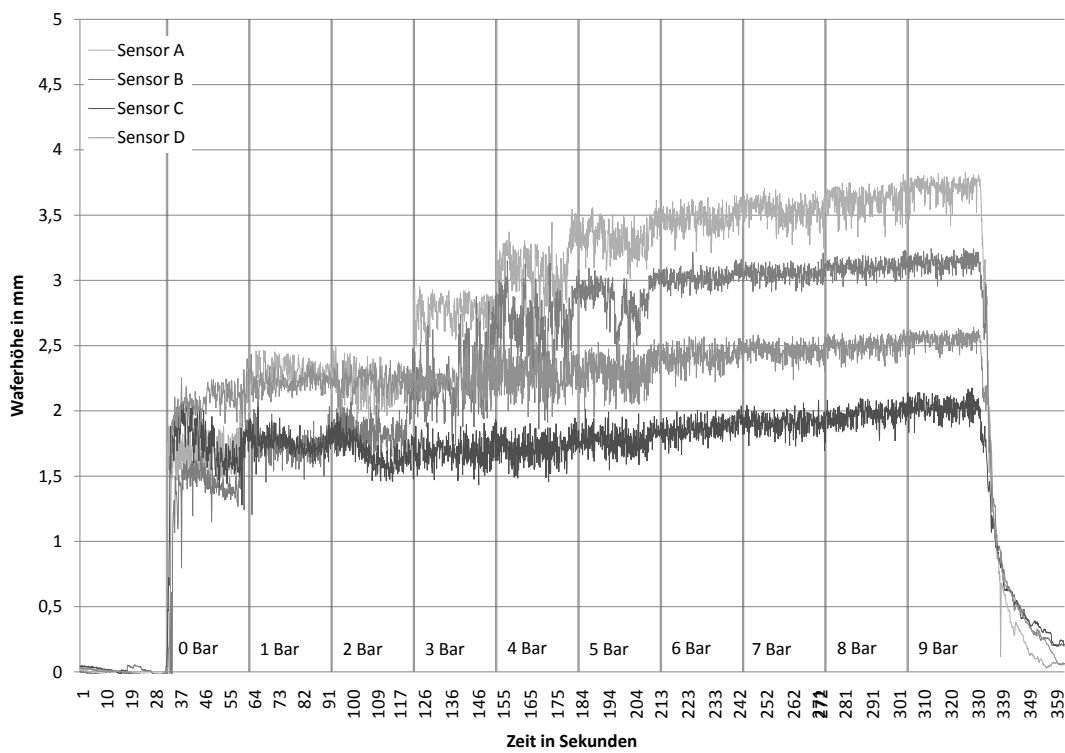


Abbildung 5.21: Rollwinkel bei Einsatz der seitlichen Flachstrahldüsen bei  $\alpha^h = -10^\circ$ ,  $p_{st}^o = 4$  bar,  $p_{st}^h = 6$  bar,  $p_{st}^s = 0-9$  bar (mit Kassette)

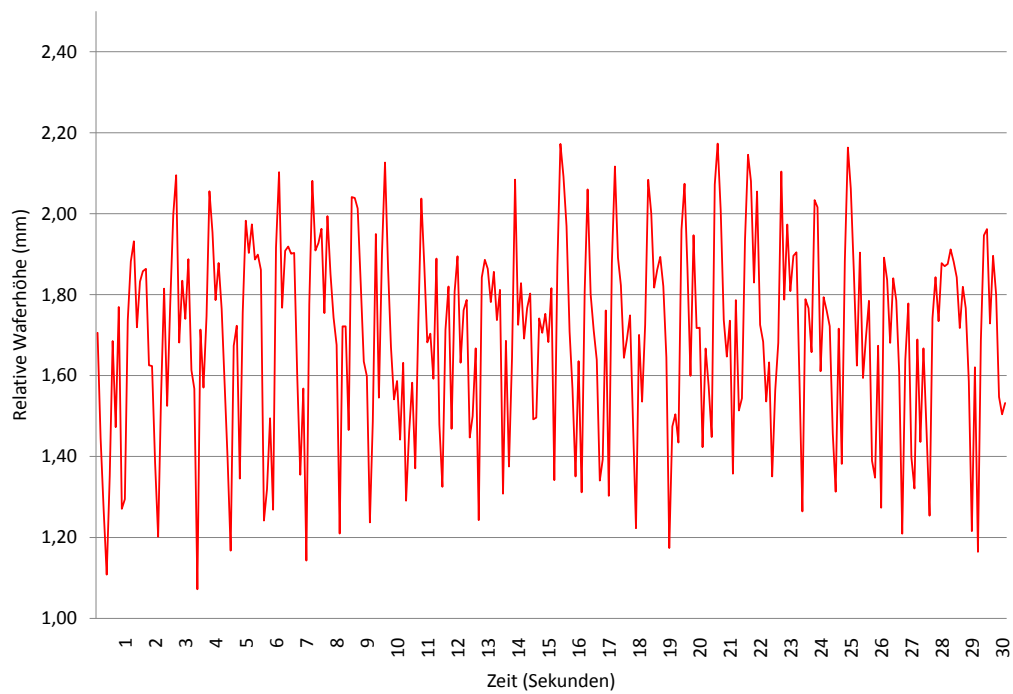


Abbildung 5.22: Relative Waferhöhe bei  $p_{st}^h = 4$  bar und  $p_{st}^o = 3$  bar



## 6 Realisierung und praktische Erprobung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell wurde in einen Prototyp umgesetzt. Dabei fließen die Erkenntnisse der experimentellen Versuchsreihen mit ein. Der Prototyp orientiert sich weitestgehend bei der Gestaltung und Auswahl der Komponenten an der Übertragbarkeit in die industrielle Anwendung. Bei der Umsetzung wurde besonders auf einen einfachen Aufbau geachtet, insbesondere bei der Verwendung der Aktorik und Sensorik. Bedingt durch die feuchte und teilweise aggressive Umgebung werden diese auf ein Minimum reduziert, so dass sich der Prototyp mit einem Sensor und zwei Antrieben betreiben lässt. Weiterhin wird der Prototyp so ausgelegt, dass der Betrieb bei Störung durch manuellen Eingriff schnell wieder hergestellt werden kann.

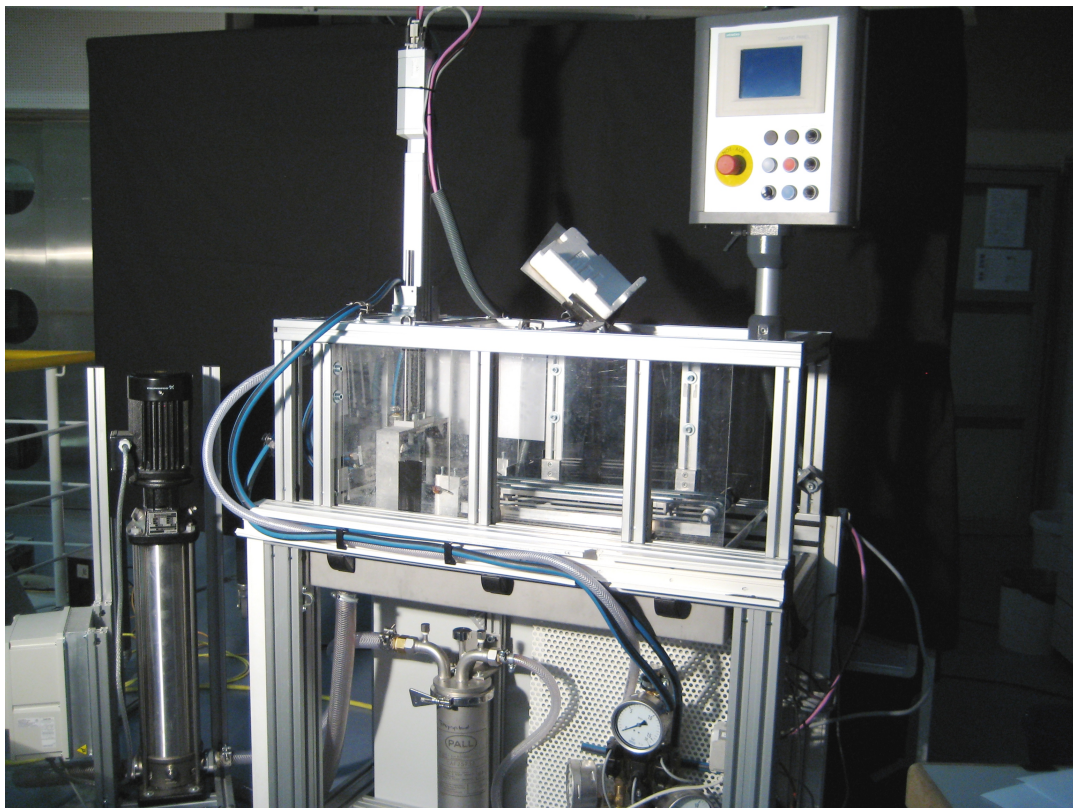


Abbildung 6.1: Prototyp für die Demonstration des flüssigkeitsbasierten Vereinzelungsverfahrens

Als Testwafer werden mono- und multikristalline Wafer mit den Dicken 180  $\mu\text{m}$  und 210  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Kantenlänge der Wafer beträgt die derzeit üblichen 156 mm. Die Wafer werden in einem Stapel in die Anlage eingelegt. Nach erfolgter Vereinzelung werden die Wafer durch ein Förderband abtransportiert. Die Entnahme vom Förderband erfolgt wiederum manuell. In einer industriellen Version können die Wafer entweder direkt zur Reinigung weiter transportiert oder in einem Carrier eingehordet werden. Beim Test der Anlage wird der Fokus vor allem auf das Vereinzelungsergebnis und die mechanische Charakterisierung der Wafer gelegt. Der Prototyp ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

### 6.1 Beschreibung des Prototypen

Zur Realisierung des Verfahrens ist eine Vorrichtung (Hubeinheit) erforderlich, welche den Waferstapel in vertikaler Richtung verschieben kann. Für den Antrieb dieser Hubeinheit wurden eine Linearführung mit einer Kugelumlaufspindel und ein Servomotor der Firma Festo gewählt. Die Spindelsteigung der Lineareinheit beträgt 10 mm pro Umdrehung. Auf den Motor ist ein 7:1-Getriebe angeflanscht. Die Einheit arbeitet mit einer Wiederholgenauigkeit von  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beträgt 0,15 m/s. Damit ist die Einheit in der Lage, die erforderliche Taktfrequenz zu erreichen. Der Servomotor wird über das Feldbus-System *Profibus* angesteuert.

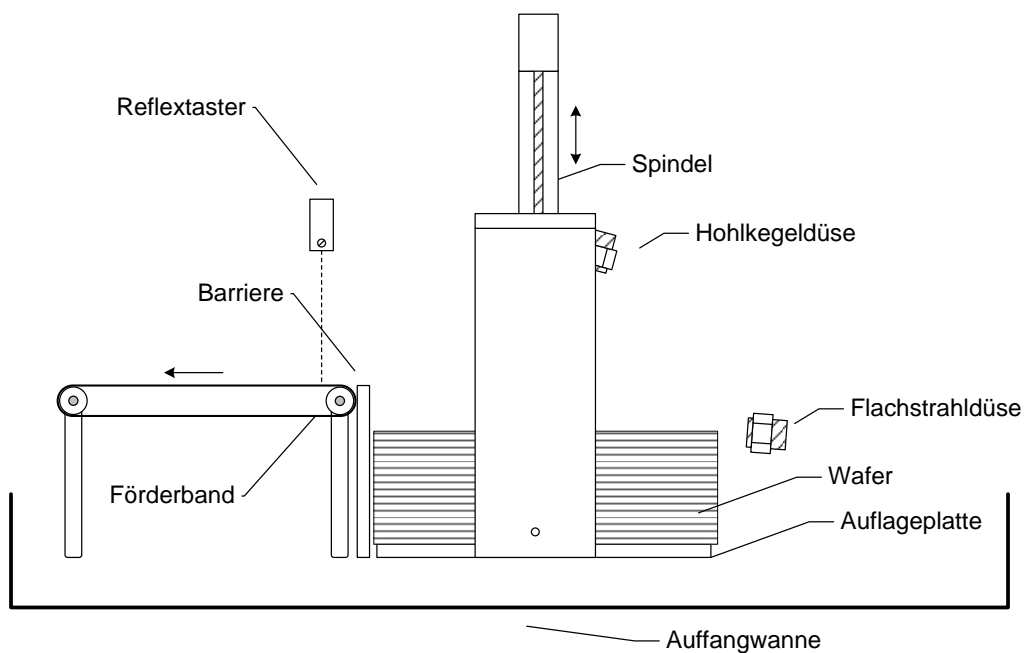


Abbildung 6.2: Prinzipzeichnung mit den wichtigsten Komponenten des Prototypen

Für die Aufnahme des Waferstapels wurde eine Plattform konstruiert, deren Neigung um die y-Achse justierbar ist. Diese Justage hat sich bei den experimentellen Untersuchungen am Versuchsstand als notwendig erwiesen. Bei exakter horizontaler Ausrichtung des Waferstapels kann es zu unerwünschten Verschiebungen von Wafern kommen, wenn diese durch den Eintrag des Wassers die Haftreibung überwinden. Eine geringe Neigung in Richtung der Barriere ist daher notwendig, um die Wafer in definierter Lage zu halten. Zur Führung der Wafer sind verschiebbare Seitenwände vorgesehen. Damit kann auch der Einsatz einer Kassette simuliert werden. Das Prinzip des Prototypen ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Das durch die Düsen versprühte Wasser wird in einer Wanne aufgefangen und im Umlaufprinzip der Pumpe wieder zugeführt. Als Pumpe wird derselbe Typ wie im Versuchsstand verwendet (siehe Abschnitt 5.1). Das Wasser wird durch einen Kerzenfilter mit 100  $\mu\text{m}$  Porengröße gepumpt, um Verunreinigungen zu filtern, welche die Düsen verstopfen könnten. Der Wasserstrom aus dem Druckrohr wird über ein Verteilerrohr auf drei Stränge aufgeteilt. Diese sind:

- Strang zur Versorgung der oberen Hohlkegeldüse
- Strang zur Versorgung der hinteren Flachstrahldüsen
- Strang als Reserve

Die Stränge können einzeln über Magnetventile geschaltet werden. Die Leistung der Pumpe wird über einen Frequenzumrichter gesteuert. Als Taktgeber für den Vorschub der Hubeinheit wird ein optischer Reflextaster eingesetzt, welcher nach der Barriere den Übergang des Wafers auf das Förderband detektiert. Die Steuerung erfolgt durch eine Beckhoff TwinCAT SPS, wofür die entsprechenden Funktionsbausteine zur Ansteuerung des Servomotorcontrollers der Hubeinheit existieren. Der Auslauf in Form des Förderbandes wird über einen DC-Motor der Fa. Maxon betrieben.

Der Prototyp erlaubt die Einstellung verschiedener Parameter, von denen einige auch im Versuchsstand eingesetzt wurden. Die folgenden Parameter sind dabei bestimmend für den Vereinzelungsablauf.

- $p_{st}^o$ : Druck des Wassers vor der oberen Hohlkegeldüse
- $p_{st}^h$ : Druck des Wassers vor den hinteren Flachstrahldüsen
- $\alpha^o$ : Angriffswinkel der oberen Hohlkegeldüse
- $\alpha^h$ : Angriffswinkel der hinteren Flachstrahldüsen



- $d_w$ : Hubdistanz abhängig von der Waferdicke
- $d_t$ : zeitabhängige Hubdistanz
- $t_w$ : Timer für den Hub nach erfolgtem Durchgang eines Wafers durch den Reflextaster
- $t_i$ : Timer für den zeitgesteuerten inkrementellen Hub

### 6.2 Steuerung und Betrieb der Anlage

Zu Beginn wird der Waferstapel in die Hubeinheit eingelegt und mit dem obersten Wafer in Höhe der Barriere gefahren. Die Vereinzelung beginnt mit Einschalten der Pumpe und der Freigabe der Ventile für die Düsen nach erfolgtem Aufbau des Drucks. Der Druck auf die Düsen wird über Manometer eingestellt. Der Reflextaster detektiert einen vereinzelt Wafer beim Übergang über die Barriere auf das Förderband. Damit löst die Steuerung nach Ablauf des Timers  $t_w$  einen Hub über die Distanz  $d_w$  aus. Die Distanz  $d_w$  leitet sich aus der mittleren Waferdicke ab. Da die Waferdicke Variationen unterliegt, wird auch ein Timer  $t_w$  verwendet, welcher den Hub um die Distanz  $d_t$  auslöst,  $d_t$  ist dabei ein minimales Inkrement, um den nächsten Wafer in den Strahl der hinteren Flachstrahldüsen zu bewegen. Wird innerhalb des durch  $t_w$  festgelegten Intervalls kein Waferdurchgang am Reflextaster detektiert, wird der Hub mit der Distanz  $d_t$  ausgelöst. Der Ablauf der Vereinzelung ist im Programmablaufplan in Abbildung 6.3 dargestellt.

Nach ersten Tests der Anlage zeigt sich, dass die Kombination der Kräfte  $F_x^h$  und  $F_x^o$  zum Abtransport der Wafer über die Barriere nicht in jedem Fall ausreichend ist. Nach erfolgter Vereinzelung kann der Wafer nach initialem Abtransport keinen hinreichenden Bewegungsimpuls erhalten und damit das Förderband nicht erreichen. Daher wird über das Reserveventil eine weitere Flachstrahldüse geschaltet, welche von hinten schräg auf die Wafer gerichtet ist, wie in Abbildung 6.4 gezeigt wird. Dadurch erfährt der vereinzelt Wafer sowohl einen zusätzlichen Schub. Weiterhin wird durch weitere Einbringung von Flüssigkeit unter dem vereinzelt Wafer die Haftreibung vermindert.

Damit wird ein weiterer Parameter für den Betrieb des Prototypen definiert:

- $p_{st}^t$ : Druck des Wassers vor der Transportdüse

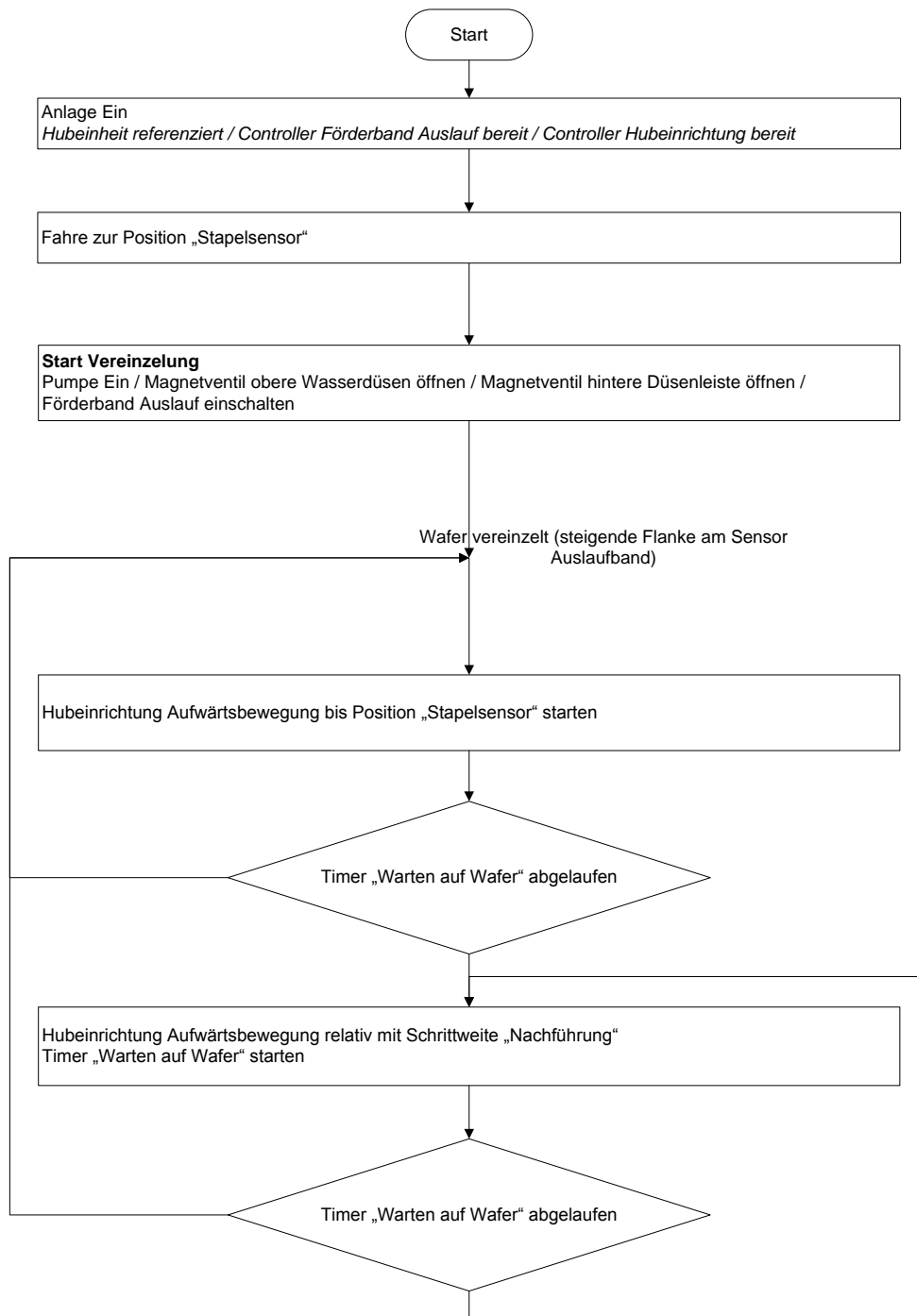


Abbildung 6.3: Übersicht über den Programm Ablauf Plan (PAP)

### 6.3 Überprüfung des Schädigungspotentials des Verfahrens

Die Gefahr des Waferbruchs in der späteren Prozessierung wie auch im fertigen Modul erhöht sich mit der Ausbildung von Mikrorissen (Siehe dazu auch Abschnitt 3.5). Daher wird das Verfahren auf das Schädigungspotential hin untersucht, welches auf den Wafer einwirkt.

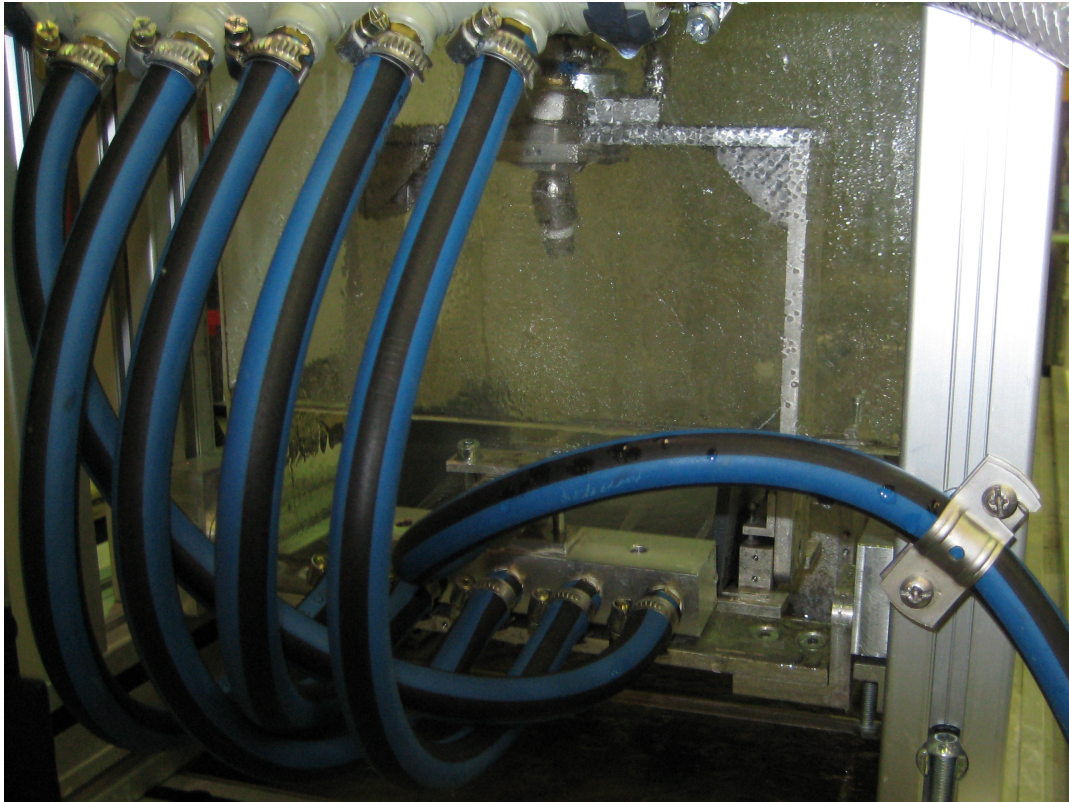


Abbildung 6.4: Ansicht der Düsenleiste mit aufgesetzter zusätzlicher Düse

Zu diesem Zweck wird eine Anlage zur Mikrorissprüfung verwendet, wie sie auch in der industriellen Produktion eingesetzt wird. Hersteller der Anlage ist die Fa. Manz Automation. Das Verfahren beruht auf der Durchleuchtung des Wafers mit Licht im Infrarotbereich und einer Auswertung des sich daraus ergebenden Bildes. Infrarotlicht wird bei diesem Verfahren eingesetzt, da Silizium in diesem Spektrum eine vergleichsweise hohe Transmissionsfähigkeit besitzt. Die Detektion von Mikrorissen erfolgt dabei über Brechungen des Lichts an diesen Stellen. Das Prüfgerät ist in Abbildung 6.5 abgebildet.

Zur Überprüfung des Schädigungspotentials wurden aus einer Charge multikristalliner Wafer mit einer Dicke von 210  $\mu\text{m}$  zwei Lose zu je 80 Wafer gebildet. Das erste Los wurde ohne weitere Bearbeitung durch die Mikrorissprüfung überprüft und dient damit als Referenz zum zweiten Los. Dieses wurde mit dem Prototypen vereinzelt. Nach erfolgter Trocknung wurden die Wafer ebenfalls durch die Mikrorissprüfung überprüft. Dabei wurden weder im Referenzlos noch im vereinzelt Los Mikrorisse entdeckt. Lediglich ein Wafer wies bei der Überprüfung eine Unregelmäßigkeit auf (siehe Abbildung 6.7). Das Rissbild



Abbildung 6.5: Prüfgerät zur Mikrorissprüfung mit geöffnetem Durchleuchtungsraum

dieses Wafers ist untypisch. Daher kann es sich dabei auch um eine Verschmutzung oder einen Einschluss handeln, welcher als Mikroriss detektiert wurde. Zum Vergleich ist in Abbildung 6.6 eine Anzeige eines typischen Mikrorisses abgebildet.

Zusammenfassend ist mit dem verwendeten Verfahren zur Überprüfung der Waferintegrität keine Rissbildung durch die Vereinzelung festzustellen. Das Verfahren kann daher als grundlegend geeignet angesehen werden, feuchte Wafer ohne Schädigung derselben zu vereinzeln.

### 6.4 Überprüfung des Vereinzelungsergebnisses

In nachfolgenden Tests werden die Wafer vereinzelt und die Güte der Vereinzelung dahingehend gemessen, ob mehr als ein Wafer vereinzelt wird (doppelte Wafer). Dabei wurde das Testlos aus Abschnitt 6.3 mit 80 Wafern verwendet. Dieses wurde für den Test der Anlage sechs Mal vereinzelt. Dabei zeigt sich,

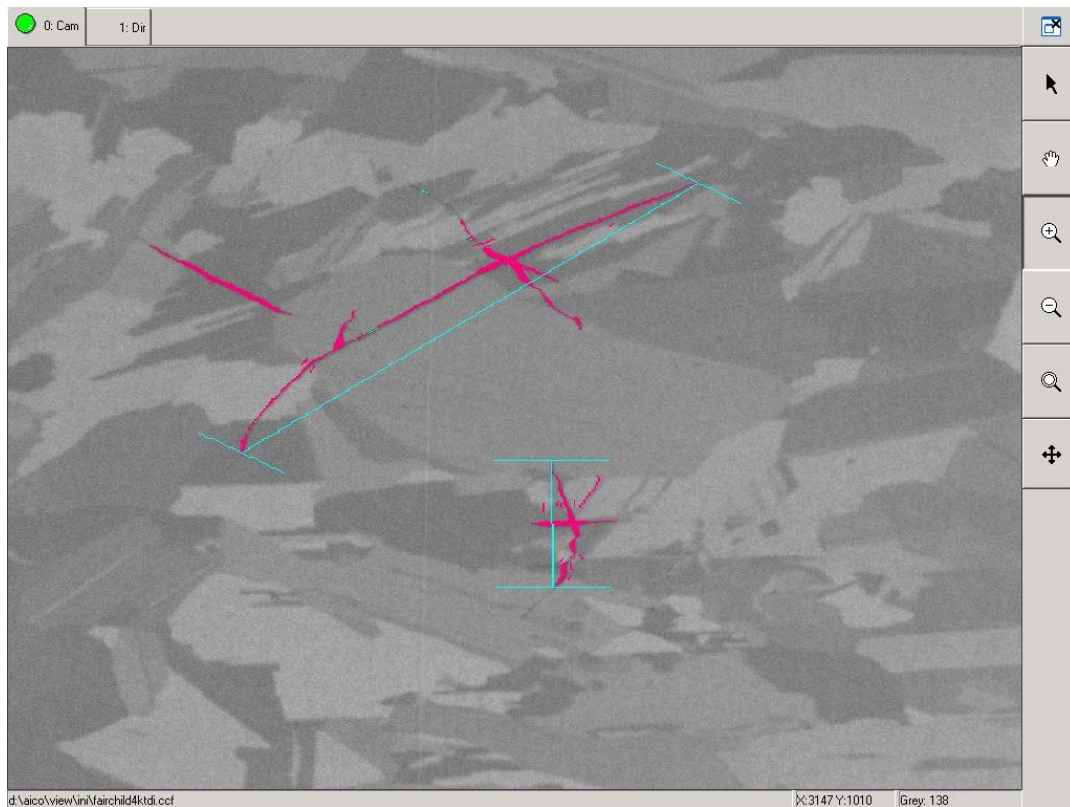


Abbildung 6.6: Beispiel eines Wafers mit einem detektierten Mikroriss in überlagerter Darstellung

dass zum einen die Geschwindigkeit der Anlage, zum anderen die Vereinzelungsgüte noch nicht den Anforderungen für den industriellen Einsatz genügen. Nachfolgend sind in Tabelle 6.1 die Ergebnisse zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im statischen Fall (ohne Abtransport der Wafer) sind für den dynamischen Fall (Abtransport der Wafer) von Relevanz. Es zeigt sich beispielsweise, dass ein ungenügender Druck der oberen Hohlkegeldüse die Wafer in eine geringer definierte Lage bringen kann, meist durch eine Vergrößerung des Rollwinkels. Dadurch ist eine zuverlässige Vereinzelung und ein Abtransport des Wafers nicht gewährleistet. Ein Druck von  $p_{st}^o$  von mindestens 2,5 bar ist daher erforderlich. Die Kraft der hinteren Flachstrahldüsen ist gleichermaßen von Bedeutung. Dort zeigt sich jedoch, dass ein Druck von  $p_{st}^h$  größer 3 bar für die Vereinzelung nicht förderlich ist, da die Kraft  $F_x^h$  zu groß wird und der Wafer durch den Impuls zu schnell über die Barriere beschleunigt wird. Dies kann zu Beschädigungen der Kanten führen. Aus diesem Grund wurden die Parameter  $p_{st}^o$  und  $p_{st}^h$  entsprechend eingestellt. Der Parameter  $p_{st}^t$  wird bei 2 bar eingestellt, da dadurch der Abtransport des Wafers gut unterstützt wird, ohne die Wa-

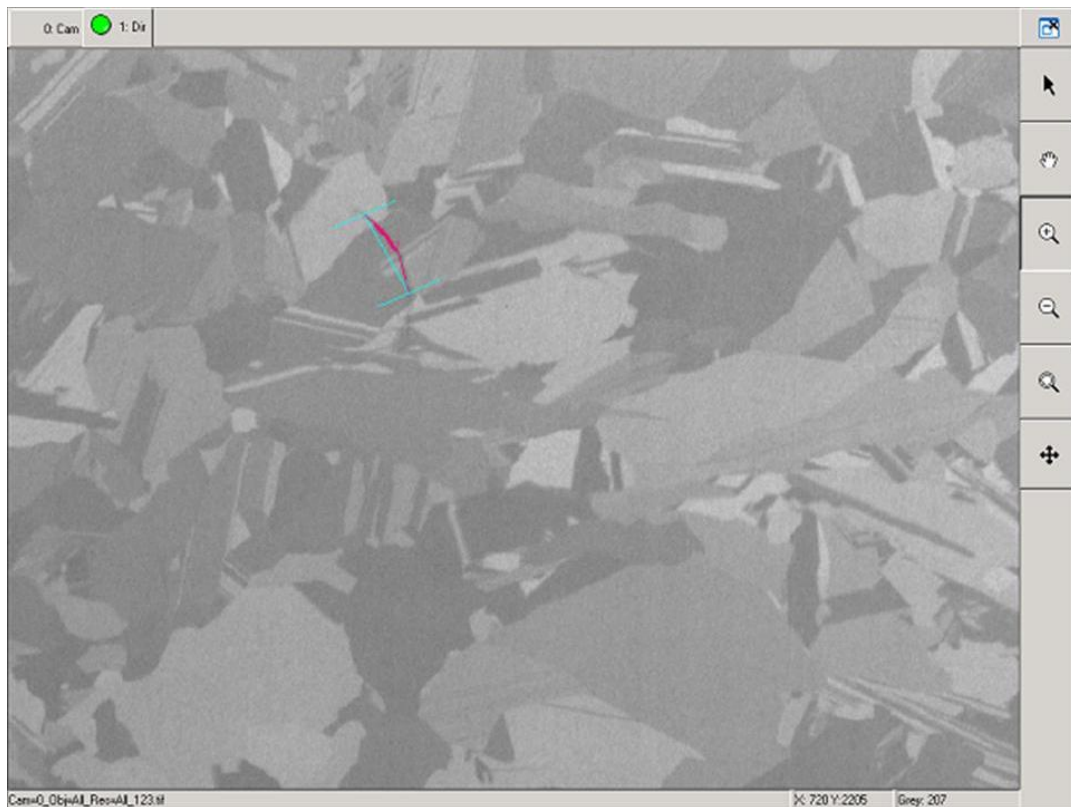


Abbildung 6.7: Wafer aus Los 2 mit uneindeutigem Befund hinsichtlich Mikrorissen in überlagelter Darstellung  
ferhöhe zu stark zu beeinflussen. Bei den zeitabhängigen Parametern wurde für  $t_w = 0,5$  Sekunden und für  $t_i = 4$  Sekunden gewählt. Für  $d_w$  wurden  $220 \mu\text{m}$  gewählt, was der Waferdicke plus dem Wasserfilm entspricht, welcher sich zwischen den Wafern befindet. Für  $d_i$  initial  $20 \mu\text{m}$  gewählt.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Vereinzelungsexperimente mit dem Prototypen

| Versuch | Anzahl doppelter Wafer | Taktzeit (Wafer/sek) | $p_{st}^o$ | $p_{st}^h$ | $p_{st}^t$ |
|---------|------------------------|----------------------|------------|------------|------------|
| 1       | 6                      | 0,29                 | 3          | 3          | 2          |
| 2       | 5                      | 0,24                 | 3          | 3          | 2          |
| 3       | 8                      | 0,26                 | 3          | 3          | 2          |
| 4       | 5                      | 0,23                 | 2,5        | 2          | 2          |
| 5       | 3                      | 0,24                 | 2,5        | 2          | 2          |
| 6       | 5                      | 0,20                 | 2,5        | 2          | 2          |

Das Vorkommen doppelter Wafer erklärt sich durch Ungenauigkeiten der Positionierung der Hubeinheit. Es zeigt sich, dass die Abweichung beim Bewegen des Aufnahmekorbs im Bereich der Waferdicke von  $210 \mu\text{m}$  bis zu  $20 \mu\text{m}$  betragen kann. Dies liegt daran, dass bei der verwendeten Konfiguration des Antriebs eine Drehung von  $7,56^\circ$  erforderlich ist. Dies ist mit hinreichender Genauigkeit mit dem verwendeten Antrieb nicht realisierbar. Zum anderen kann der Abtransport des Wafers trotz der zusätzlichen Düse

verzögert werden. Abhilfe können dabei die beschriebene genauere Positionierung schaffen und gegebenenfalls weitere Düsen, welche den Transport des vereinzelt Wafer weiter unterstützen. Doppelte Wafer treten bei den Tests jedoch zu einem überwiegenden Teil mit einem Versatz auf (siehe Abbildung 6.8). Eine weitere Vorrichtung, beispielsweise eine Beschleunigungsstrecke, könnte diese überlagerten Wafer weiter separieren.

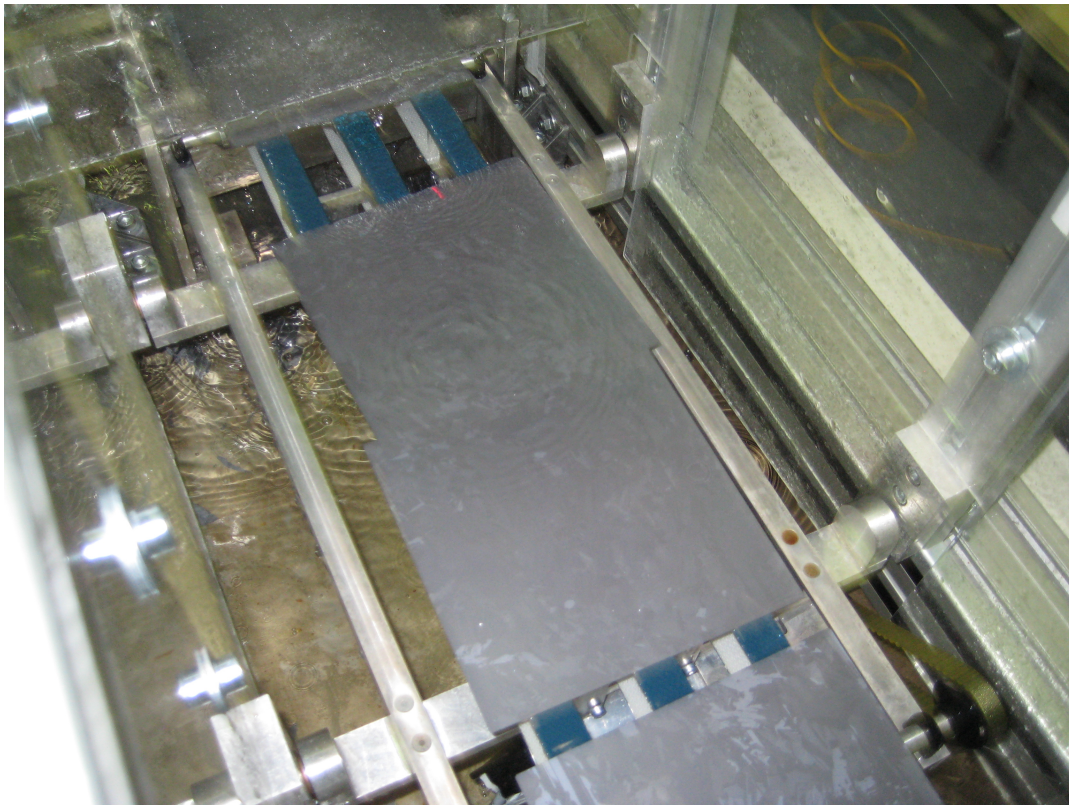


Abbildung 6.8: Doppelte Wafer in versetzter Überlagerung

Die Taktzeit kann durch eine Beschleunigung des Auslaufbandes erzielt werden wie auch durch einen geänderten Antrieb, welcher es ermöglicht schnell einen Hub von  $10\ \mu\text{m}$  präzise zu realisieren. Die derzeitige Taktzeit wird stark durch aufsummierte Wartezeiten determiniert, falls zu einem Zeitpunkt kein Wafer am Reflextaster detektiert wird. Die derzeit verwendete Antriebseinheit ist nicht dafür geeignet, ein Inkrement in der Größenordnung von  $10\ \mu\text{m}$  zu fahren, da der Widerstand der Spindel mit Gewicht des Korbes nicht sicher überwunden werden kann.

## 6.5 Abgleich der erzielten Ergebnisse anhand der Anforderungen

In folgender Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Versuche mit dem Prototypen den in Abschnitt 3.8 dokumentierten Anforderungen gegenübergestellt.

Tabelle 6.2: Erfüllungsgrad der Anforderungen  
(●: geeignet, ◐: bedingt geeignet, ○: nicht geeignet)

| Nr. | Anforderung  | Erfüllungsgrad | Kommentar  |
|-----|--|----------------|--|
| A1  | Das Verfahren sollte möglichst beeinflussungsarm auf den Wafer sein  | ●              | Belastungen auf Flächen und Kanten sind minimal                        |
| A2  | Das Verfahren soll die Wafer von einem Stapel vereinzeln, welcher vollständig vom Werkstückträger gelöst ist | ●              | Vereinzlung erfolgt vom gelösten Stapel                                |
| A3  | Die Vereinzlung aus einer Kassette sollte möglich sein   | ●              | Die Verwendung einer Kassette ist mit dem Verfahren möglich            |
| A4  | Die Zahl der Freiheitsgrade für die Bewegung des Wafers sollte gering sein                                   | ●              | Wafer im Stapel werden vor der Vereinzlung nur in eine Richtung bewegt |
| A5  | Der Ordnungszustand der Wafer sollte für das Vereinzeln möglichst hoch sein                                  | ●              | Siehe A4   |
| A6  | Die Vereinzlung soll Wafer mit Kleberrückständen verarbeiten können  | ●              | Kleberrückstände werden weggespült                                     |
| A7  | Resistenz gegenüber prozesstechnischen Einflüssen der Produktionsumgebung                                    | ●              | Aktorik und Sensorik sind außerhalb des Naßbereiches                   |
| A8  | Erhalt eines Flüssigkeitsfilms der Wafer   | ●              | Wafer werden durchgehend mit Flüssigkeit besprüht                      |
| A9  | Hohe Störungssicherheit und Entstörbarkeit   | ◐              | Im Prototypenstadium noch nicht vollständig erreicht                   |
| A10 | Hohe Ausbeute und geringer Bruch   | ●              | Keine Schädigung der Wafer detektierbar                                |
| A11 | Vermeidung doppelter Wafer   | ◐              | Im Prototypenstadium noch nicht vollständig erreicht                   |
| A12 | Investitions- und Betriebskosten   | ●              | Geringe Kosten durch reduzierte Sensorik und Aktorik                   |
| A13 | Adäquate Geschwindigkeit   | ◐              | Im Prototypenstadium noch nicht vollständig erreicht                   |





## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Erfolg der Photovoltaik in Deutschland und der Welt basiert derzeit auf der indirekten Subventionierung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und vergleichbare Instrumente in anderen Regionen. Auch unter der Prämisse, dass der derzeitige Gestehungspreis für konventionell erzeugte Elektrizität die realen Kosten, bedingt durch mögliche zukünftige Umweltschäden und Ressourcenknappheit, nur unzureichend widerspiegelt, sind weitere Kostensenkungen in der Produktion unabdingbar. Durch den hohen Kostenanteil der Wafer am Modul liegt in der Waferfertigung das größte Kostensenkungspotential. Die Vereinzelung feuchter Siliziumwafer ist aus Durchsatz- und Qualitätsaspekten ein wichtiger Schritt in der Fertigung. Durch die hohe Bruchgefahr bei der Handhabung von Wafern kann die Vereinzelung auch wesentlich zur Kostenreduktion beitragen.

Die in Literatur und Patenten beschriebenen Verfahren sind derzeit noch nicht in einem ausgereiften Zustand, um die Vereinzelung von Wafern sicher und zuverlässig durchzuführen. Daher sind weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung nötig, um die derzeitigen und zukünftigen Anforderungen zu erfüllen. Gleichzeitig muss das Verständnis über die Vorgänge bei der Vereinzelung sowie die Einflüsse auf den Wafer weiter vertieft werden. Insbesondere das Schädigungspotential der Vereinzelung auf den Wafer bestimmt die Auslegung eines solchen Systems in besonderem Maße.

Die vorliegende Arbeit analysiert zunächst die Ausgangssituation in der derzeitigen Waferproduktion. Die Umgebung in der Waferproduktion ist geprägt durch eine Vielzahl von Einflüssen, besonders durch flüssige Betriebsstoffe wie der Slurry oder auch den Reinigungsmedien. Die zu vereinzelnden Wafer sind fragile und spröde Substrate welche in dieser Umgebung verarbeitet werden müssen. Entsprechend vielseitig ist der derzeitige Stand der Technik zur Vereinzelung, welcher größtenteils in Patentschriften beschrieben ist. Zur weiteren Entwicklung eines Vereinzelungsverfahrens wird die Aufgabe weiter analysiert. Durch Versuche in einer realen Fertigungsumgebung erscheint die Vereinzelung vom Stapel als vielversprechender Ansatz. Die Fragilität des Substrats führt zu der Überlegung, Flüssigkeitsstrahlen zur Vereinzelung der Wafer einzusetzen. Damit soll eine schonende Handhabung der Wafer erzielt werden. Das Prinzip dieser Vereinzelung vom Stapel wird dann zunächst in einem Modell beschrieben und entsprechend berechnet.

Zur Überprüfung und Validierung des Modells wird zunächst ein Versuchsstand entwickelt an welchem die Einflüsse der Flüssigkeitsstrahlen auf den Wafer detailliert untersucht werden können. Die Erkenntnisse aus dem Betrieb des Versuchsstandes fließen in die Konstruktion eines Prototypen ein. Gleichzeitig können die Einstellungen des Prototypen anhand der Ergebnisse aus den Versuchsreihen initial eingestellt werden. Die Tests mit dem Prototypen zeigen eine prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens.

Weiterer Bedarf in Forschung und Entwicklung liegt in der Optimierung von Verfahren im industriellen Umfeld. Eine hohe Zuverlässigkeit bei der Vereinzelung bei gleichzeitig störungsunempfindlichem Betrieb sind dabei wichtige Indikatoren für den Erfolg von Vereinzelungsverfahren. Technologisch kommen weitere Anforderungen auf die Waferbehandlung zu. Der Trend zu dünneren Wafern (kleiner als 180-210  $\mu\text{m}$ ) ist derzeit durch die gesunkenen Kosten für das reine Silizium nicht mehr der zentrale Fokus der Entwicklung. Sobald jedoch weitere Kostensenkungspotentiale an anderer Stelle realisiert werden können, wird die Dicke der Wafer vermutlich wieder an Bedeutung zunehmen. Möglicherweise werden auch größere Waferformate (größer 200 mm Kantenlänge) in Zukunft in die Massenfertigung eingeführt werden. Die Verfahren und Anlagen müssen dann entsprechend angepasst werden. Eine weitere einflussreiche Entwicklung kann die Umstellung Slurry-basierter Trennverfahren auf alternative Technologien darstellen. Insbesondere das Sägen mit Diamantdraht (mit Industriediamanten besetzter Schneidedraht) wird die Vereinzelung vor neue Herausforderungen stellen, da sich die Oberflächeneigenschaften damit ändern.

## 8 Abstract

Wafer manufacturing is an important aspect to optimize the costs in the solar value chain for crystalline photovoltaic products. However, before a wafer is assembled in a module it has to undergo numerous process steps like the mechanical cutting, heating and pressing of the wafer as well as several more stressful operations including the handling. Hence, it is no wonder that wafer breakage still is a major concern in the process chain. The main manufacturing areas a wafer has to pass are wafer manufacturing (the raw wafer is produced), cell manufacturing (the wafer is processed into a photovoltaic cell) and module manufacturing (the cells are interconnected in a larger module). In comparison to the cell manufacturing in which a cleanroom is often applied the processing in the wafer manufacturing is very dirty. In the wafer manufacturing, wafers are cut out of an ingot with a wire saw. A slurry mainly based on glycol and silicon carbide is currently used as the abrasive medium. Before sawing the ingots, one or more such ingots are glued to a plate, the so-called „beam“ (very often made of glass), which in turn is glued to a re-usable dovetail-shaped carrier. This carrier is then clamped into the wire saw. After the wafers are cut out, they are still glued to the beam. The actual tricky part therefore consists of separating the sawn ingot into individual wafers which can then be cleaned, characterized and packaged.

Though wafers might be separated several times during the whole manufacturing process the only time they are still wet and laded with many residues is in the wafer manufacturing. In former times, wafers have been separated by hand which can still be seen in some manufacturing facilities. The operator collects a number of wafers and carefully removes it from the beam. Afterwards, the wafers are separated one by one from this package and sorted into a carrier or placed on a conveyor belt for the cleaning process. Because of the typical human hand-span the manual separation was a lot easier with the former 125 mm wafers than it is now with the current 156 mm wafers. In terms of the throughput and the yield an automated method for this step is highly preferable. Therefore, several equipment manufactures as well as wafer manufacturers invested considerable R&D effort to automate the wafer separation. A good overview on both proposed and implemented solutions can be gained by analyzing existing patents describing automated separation techniques. About 12 relevant patents have been analyzed that give a good picture of possible solutions.

One major option is to separate the wafers directly from the beam when the wafers are still adhered to it. A further option is to unglue the whole sawn ingot and to collect the wafers in a special carrier or in packages for further processing steps. Both approaches have advantages and disadvantages. If the wafers are separated directly from the beam they are in a defined position and usually do not need any additional support. Ideally, each wafer stands on a thin bar of glue as the saw also cuts the beam. However, in a manufacturing environment some wafers might already be dissolved from the glue and in this way form an obstacle to the separation. Additionally, the adhesive force of the glue might vary in a large range. As a result, larger mechanical forces would be needed to dissolve them.

The other approach requires the dissolving of the entire wafer stack from the beam as well as the collection of the wafers for the separation process. The dissolving can be achieved by using warm water or a chemical solvent, depending on the type of glue. As soon as the wafers are collected they are arranged in a defined and secure manner. This transfer requires an extra handling step in which the wafers are gripped or clamped at the edges. Even though this is an additional hazard to the material integrity the advantages of the latter approach seem to outweigh the disadvantages as most known solutions offered on the market have chosen this approach. One reason for this decision is the typical situation in a manufacturing environment which is described in the following.

It is a fundamental decision whether the wafers should be separated directly from the beam or whether they should be dissolved and collected in a stack. Therefore, several experiments have been conducted in a manufacturing environment to determine the adhesive force of the adhesive bar which connects the wafer with the beam. In these experiments, the ingots were processed by using a set of different process parameters. After the sawing of these ingots the wafers are drawn from the ingot by means of an experimental equipment that features a vacuum pad. This equipment grips the wafer on the entire surface and records the force that is needed to dissolve the wafer from the beam with a load cell. Several experiments were performed by using a number of silicon ingots with different manufacturing parameters. These parameters include the adhesive type, the duration of placement in a cleaning solvent and the angle of the vacuum pad. Three different types of two-component epoxy adhesives were used. The ingots were placed in a hygroscopic cleaning solvent that consists of an aliphatic compound. This cleaning solvent usually has a disintegrating effect on the epoxy adhesive. In the experiments, no correlation between the varie-

---

gated parameters could be observed. Instead, the adhesive forces vary significantly. In some experiments, all wafers were dissolved from the beam by the cleaning agent whereas other experiments showed no influence of the cleaning agent on the adhering forces.

Several solutions to separate wafers from a stack are in use or are described in patents. The main difference between the methods is the orientation of the stack. Some solutions clamp the wafers vertically into the stack in order to be able to process all wafers on the beam in one run. Other solutions use stacks in which the wafers are in a horizontal position. As a consequence, these stacks are limited in height because the tolerable weight on the lowermost wafers is limited. Both approaches again have advantages and disadvantages. The clamping mechanism for the vertical presentation of wafers is more complex and requires precautions in order to avoid harming the wafers. The horizontal stacking of wafers allows the usage of comparatively simple cassettes but limits the amount of wafers in such a cassette and therefore requires a constant re-loading of the separation unit. The known separation methods comprise different approaches. A well-known solution from other industries is the placement of a stack of wafers on synchronously powered rolls which separate a wafer by conveying it beneath a separator. Other solutions use grippers or conveyor belts to transport separated wafers from a vertical aligned stack. In such solutions, water jets are sometimes used to support the separation of the wafers.

In this thesis, a method for separating wafers on the basis of fluid jets has been developed and analyzed. This method utilizes fluid jets to separate wafers from each other. Furthermore, the fluid jets are directed to move the separated wafer over a barrier. Basically, a stack of wafers is placed on a platform which can be traversed vertically. The wafer on top of the stack is moved into the fluid jet which separates it and afterwards moves it over a barrier. A conveyor belt transports the wafers to further processing stages, usually to an in-line cleaning equipment or an indexer which collects the wafers in a carrier.

The procedure was developed with the intention to minimize the mechanical stress on the wafer. However, the force of the waterjets can also reach a level that might harm the wafers. Additionally, the quality of the separation process is dependent on other parameters such as the location and the angle of the water jets. Therefore, an experimental set-up was constructed in which the top wafer is separated but not carried away. Instead, the elevation of the wafer is constantly monitored by a special configuration of four laser distance sensors. This allows the measurement and the recording of the influence of the waterjets on the elevation, the tilt and the vibration of the wafer. By means of this set-up, several experiments were

executed and an optimal range of the parameter values was determined. This set of parameters was applied and adapted to a prototype. The advantage of the chosen approach is the opportunity to study the effects of the adjustment of the changing parameters which is not possible if the wafers are carried away.

The separation is achieved by using slit nozzles which are aligned at the rear, opposite to the barrier. About four to five nozzles are evenly spaced at the length of the wafer. By tilting them, they can be set at an angle of  $-25^\circ$  and  $+25^\circ$  to the wafer. The upper nozzle emits a cone-shaped jet and can be tilted to add an additional momentum to the wafer. The main purpose of the upper nozzle is the generation of a force which partially neutralizes the vertical momentum of the wafer which otherwise might be thrown in an undefined position by the separation effect of the rear nozzles. Furthermore, it suppresses the vibrations. Without the upper nozzle the wafer could flap uncontrolled and unguided which could damage the wafer. Nowadays, deionized water (DI-water) is used in manufacturing processes for the cleaning or as a medium for the interim storage of wafers. For this reason, water is also used as the medium for the separation process. The water is collected in a basin underneath the separation unit and pumped with a multi-stage rotary pump to the nozzles. The pressure for each nozzle unit can be adjusted. The maximal pressure can reach 10 bar whereas the separation process is accomplished with much lower pressure rates.

Distance sensors based on laser LED are used for the measurement of the wafer elevation and vibration. The used sensors have a theoretical resolution of  $2\ \mu\text{m}$  whereas about  $10\ \mu\text{m}$  can realistically be achieved. Without any precautions, the water jets would render the optical distance measurement useless as the water droplets and spray would block the signal path. Furthermore, droplets would accumulate at the sensor and in this way blur the laser beam. Therefore, a special housing was constructed and the signal path shielded with acryl glass tubes. In order to prevent the spray from entering the tubes they are constantly charged with compressed air. Four sensors were not only used to determine the elevation of the wafer but also the roll and the pitch angles.

In the following, the major results of the experiments are presented. Most of the experiments were designed by using the *ceteris paribus* principle. First of all, the pressure at one of the nozzle units was varied during one experiment. Other experiment parameters were the angle of the rear nozzle unit, the location and the angle of the upper nozzle as well as the usage of nozzles at the side of the wafers. In the first run of experiments, the influence of the upper nozzle was under investigation. The average relative elevation of a wafer changes with an increase in pressure on the upper nozzle. In the same way as the average wafer

---

elevation diminishes the fluctuation of the wafer elevation (vibration) does as well. For the later carry-off of the wafer it should be separated clearly in order to guarantee a minimum elevation. The reduction of the vibration on the other hand is considered as positive because it reduces the potential damage of the wafer. Therefore, a good setting for the upper nozzle is around 3 bar.

Suboptimal results in terms of the separation quality were achieved by a positive angle although the initial assumption suggested a good separation effect with the water jet detaining the following wafer. A neutral angle showed the same drawback as the width of the water jet expanded and seized the following wafer as well. The best separation result is achieved by a negative angle as the water jet can be adjusted in such a way that only the top wafer is affected and separated from the rest of the stack. The pressure of the rear nozzles was varied in a range of 1 to 7 bar. Depending on the angle of the rear nozzle unit a pressure of 3-4 bar was sufficient for a good separation. In all experiments, the vibration of the wafer increased with the rise of the pressure. This increase has been closely monitored because of the potential harm to the wafer.

The presentation of the wafer stack in relation to the separation unit has a large influence on the separation process itself. To prevent lateral dislocation the wafers are guided at the sides. Alternatively, a cassette can be used with which the wafer stack is inserted into the separation unit. The usage of a cassette proved not only to be advantageous because of a simplified loading but also as a method to optimize the separation procedure. By enclosing the wafer stack the liquid volume underneath the separated wafer is enlarged and stabilized. In this way, it facilitates the separation and the transport of the wafer.

Additional adaptations to the previous settings were made to optimize the separation and the transport of the wafer. The pressure on the nozzles can be decreased without impairing the quality of the separation. However, the transport of the wafers still needed additional attention. By directing the water jets of the rear nozzle from slightly underneath the wafer plane the initial velocity of the wafer needed to pass the barrier was reduced. It is therefore advantageous to somewhat split the responsibility for the separation and the initial transport by introducing a special nozzle solely responsible for vertical movement. The nozzle adds some velocity to the wafer after it was separated and begins to pass the barrier. In the experiments, wafers with a thickness of 210  $\mu\text{m}$  and 180  $\mu\text{m}$  were used. Thinner wafers will also be tested in the future.

The separation of wafers from a stack by means of water jets proved to be a feasible approach. Future work will focus on increasing the speed of the process as well as on further researching the effects of the separation on the mechanical stability. During the separation process no immediate wafer breakage could



be observed. However, the reuse of the same wafers in the separation unit increases the danger of wafer breakage. Thereby, the wafer breakage can either be caused by the manual handling and the insertion of the wafer stack or by micro-cracks in the wafer which arise during the separation process e.g. due to vibrations or edge damages. The next steps will therefore be a more detailed characterization of wafers prior to the separation by detecting possible micro-cracks and by using a subsequent cycle of repeated separations and qualifications of the same wafers in several runs.

## Literaturverzeichnis

- [von Aichberger 2004] AICHBERGER, Susanne von: Larger and thinner: Market survey on band saws and wire saws. In: *Photon International* (2004), Nr. 5, S. 76–85
- [Anspach u. a. 2009] ANSPACH, Oliver ; HURKA, B. ; ZEH, J. ; SCHULZE, F. W.: Influence of Abrasive Shape and Size Distribution on the Wire Sawing Process. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 1041–1046
- [Anspach und Lawerenz 2009] ANSPACH, Oliver ; LAWERENZ, Alexander: Understanding the role of abrasives used in the multi-wire sawing process. In: *Photovoltaics International* (2009), Nr. 6, S. 36–43
- [Bamberg und Baur 1996] BAMBERG, Günter ; BAUR, Franz: *Statistik*. 9., überarb. Aufl. München : Oldenbourg, 1996 (Oldenbourgs Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)
- [Beesley und Schönholzer 2007] BEESLEY, John G. ; SCHÖNHOLZER, Urs: Slicing 80 micrometer wafers: Process parameters in the lower dimensions. In: *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Mailand, 3-7 September, 2007, S. 956–962
- [Beyer 1966] BEYER, Gottfried: *Beitrag zur Ermittlung optimaler Bedingungen für das Vereinzeln gestapelter Papierbogen durch Saugdüsen*. Karl-Marx-Stadt, Universität, Dissertation, 1966
- [Bischof und Possart 1983] BISCHOF, Claus ; POSSART, Wulff: *Adhäsion: Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Berlin : Akademie Verlag, 1983
- [Bohne u. a. 2008] BOHNE, A. ; SCHOENFELDER, S. ; HAGENDORF, C. ; SCHMIDT, D. ; BAGDAHN, J.: The influence of the wire sawing process on mono- and multicrystalline silicon wafers. In: *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Valencia, 1 - 5 September, 2008, S. 1780–1784
- [Brun und Melkote 2006] BRUN, Xavier F. ; MELKOTE, Shreyes N.: Evaluation of handling stresses applied to EFG silicon wafer using a Bernoulli Gripper. In: *Fourth World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Bd. 2. Hawaii, 07.-12. Mai, 2006, S. 1346–1349

- [Buonassisi u. a. 2007] BUONASSISI, Tonio ; REITSMA, Scott ; SWEENEY, Robert ; PICKETT, Matthew ; HUANG, Weidong ; LESNIAK, Jon ; SPENCER, Matthew: Evolution of stresses in wafer bulks and edges during industrial solar cell processing. In: *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Mailand, 3-7 September, 2007, S. 813–815
- [Bürger u. a. 2005a] BÜRGER, N. ; HERTER, R. ; LÖHMANN, M.: Automatic wafer separation and inline cleaning for the wafer production. In: *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona, 6-10 Juni, 2005, S. 862–865
- [Bürger u. a. 2005b] BÜRGER, Norbert ; LÖHMANN, Mirko ; HERTER, Richard: *Vorrichtung zum Ablösen, Vereinzeln und Transportieren von in einer Halteeinrichtung sequenziell angeordneten Substraten*, DE 10 2005 016 519 B3. 2005
- [del Cañizo u. a. 2009] CAÑIZO, C. del ; COSO, G. del ; SINKE, W. C.: Crystalline silicon solar module technology: Towards the 1 euro per watt-peak goal. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 17 (2009), Nr. 3, S. 155–215
- [Castaldini u. a. 2002] CASTALDINI, A. ; CAVALCOLI, D. ; CAVALLINI, A. ; ROSSI, M.: Surface analyses of polycrystalline and Cz-Si wafers. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2002), S. 425–432
- [Chunduri 2009] CHUNDURI, Shravan K.: Crystallizing silicon. In: *Photon International* 2009 (2009), Nr. 6, S. 154–171
- [Coenen und Coenen 2006] COENEN, Wolfgang ; COENEN, Nils H.: *Verfahren zur Vereinzelung von scheibenförmigen Substraten unter Nutzung von Adhäsionskräften*, WO 2007/054525 A1. 2006
- [Coletti u. a. 2006] COLETTI, G. ; BORG, N. J. C. M. d. van ; IULIIS, S. de ; TOOL, C. J. J. ; GEERLINGS, L. J.: Mechanical strength of silicon wafers depending on wafer thickness and surface treatment. In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006, S. 1281–1284
- [Coletti u. a. 2005] COLETTI, G. ; TOOL, C. J. J. ; GEERLINGS, L. J.: Quantifying surface damage by measuring mechanical strength of silicon wafers. In: *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona, 6-10 Juni, 2005, S. 270–273
- [del Coso u. a. 2009] COSO, G. del ; CAÑIZO, C. del ; SINKE, W. C.: The impact of silicon feedstock on the PV module cost. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* (2009), Nr. 94, S. 1–5

- [Dechant-Wagner 2008] DECHANT-WAGNER, Roland: *Wafer separation underwater*. 2008. – URL [www.euroasiasemiconductor.com/euroasia-magazine/online-april2008/pv-coverstory.pdf](http://www.euroasiasemiconductor.com/euroasia-magazine/online-april2008/pv-coverstory.pdf). – Zugriffsdatum: 21.12.2009
- [Dominguez und Fernandez 2005] DOMINGUEZ, P. S. ; FERNANDEZ, J. M.: Introduction of thinner monocrystalline silicon wafers in an industrial cell-manufacturing facility. In: *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona, 6-10 Juni, 2005, S. 903–905
- [Döpping 2006] DÖPPING, Jürgen: *Verbundvorhaben SplitKontrol: Automatisches Splitten von Solarwafern vom gesägten Block mit anschließender Korngrößenkontrolle: Abschlussbericht SplitKontrol*. 2006
- [Dubbel und Beitz 1997] DUBBEL, Heinrich ; BEITZ, Wolfgang: *Taschenbuch für den Maschinenbau: Tabellen*. 19., völlig neubearb. Aufl. Berlin : Springer, 1997
- [Funke u. a. 2004] FUNKE, Claudia ; KULLIG, Eckehard ; KUNA, Meinhard ; MÖLLER, Hans J.: Biaxial fracture test of silicon wafers. In: *Advanced Engineering Materials* 6 (2004), Nr. 7, S. 594–598
- [Funke u. a. 2006] FUNKE, Claudia ; SCIUROVA, Olga ; KAMINSKI, Steffi ; FÜTTERER, Wolfgang ; MÖLLER, Hans J.: Mechanical properties of thin silicon wafers. In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006, S. 171–175
- [Gentischer 2000] GENTISCHER, Josef: *Verfahren und Einrichtung zum Vereinzeln von scheibenförmigen Substraten, WO 01/28745 A1*. 2000
- [Gentischer 2006] GENTISCHER, Josef: *Automatisches Splitten von Solarwafern vom gesägten Block mit anschließender Kornstrukturkontrolle: Abschlussbericht SplitKontrol*. 2006
- [Good 1976] GOOD, Robert J.: On the Definition of Adhesion. In: *The Journal of Adhesion* 8 (1976), Nr. 1, S. 1–9
- [Günter 1999] GÜNTER, Ernst: *Vorrichtung zum Ablösen, Vereinzeln und Einlagern von dünnen, bruchempfindlichen scheibenförmigen Substraten, DE 199 04 834 A1*. 1999
- [Günzel 2007] GÜNZEL, Gerald: *Untersuchungen zum Dünnen und Vereinzeln dünner Silizium-Wafer*. Hannover, Universität, Dissertation, 2007

- [Gustafsson u. a. 2008] GUSTAFSSON, J. ; LARSSON, H. ; SOLHEIM, H. J. ; BOSTRÖM, T.: Mechanical stress tests on mc-Si wafers with microcracks. In: *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Valencia, 1 - 5 September, 2008, S. 1957–1960
- [Güthenke u. a. 2002] GÜTHENKE, Gunnar ; SINHOFF, Volker ; BERTON, Frank ; SCHMIDT, Christian: *Verfahren und Vorrichtung zum Vereinzeln von scheibenförmigen Substraten, insbesondere zur Waferherstellung*, DE 199 00 671 C2. 2002
- [Hauser 1997] HAUSER, Charles: *Vorrichtung für das Einlegen von durch Zersägen eines Rohlings erhaltenen Wafern in Aufbewahrungselemente*, EP 802 028 B1. 1997
- [Hennecke Systems GmbH 2010] HENNECKE SYSTEMS GMBH: *Photovoltaic Quality Control*. 2010. – URL [http://www.hennecke-systems.de/pictures/products/hennecke\\_systems\\_products.pdf](http://www.hennecke-systems.de/pictures/products/hennecke_systems_products.pdf). – Zugriffsdatum: 02.04.2010
- [Herr 2006] HERR, Horst: *Europa Lehrmittel*. Bd. / von Horst Herr ; Bd. 2: *Mechanik der Flüssigkeiten und Gase*. 4. Aufl. Haan-Gruiten : Verl. Europa-Lehrmittel, 2006
- [Herron und Wagner 2009] HERRON, Jeremy ; WAGNER, Neelke: Q-Cells Reloaded. In: *Photon* (2009), Nr. 9, S. 58–60
- [Herter 2006] HERTER, Richard: *Vorrichtung und Verfahren zum Vereinzeln und Transportieren von Substraten*, EP 1 935 599 B 1. 2006
- [Herwig 2002] HERWIG, Heinz: *Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Physik und die mathematische Modellierung von Strömungen*. Berlin : Springer, 2002 (Engineering online library)
- [Hesse 2006] HESSE, Stefan: *Grundlagen der Handhabungstechnik: Mit 13 Tabellen sowie 17 Übungsaufgaben und 103 Kontrollfragen*. München : Hanser, 2006
- [Hesse und Schnell 2009] HESSE, Stefan ; SCHNELL, Gerhard: *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009
- [Hilmersson u. a. 2008] HILMERSSON, C. ; HESS, D. P. ; DALLAS, W. ; OSTAPENKO, S.: Crack detection in single-crystalline silicon wafers using impact testing. In: *Applied Acoustics* (2008), Nr. 8, S. 755–760

- [Hoferichter 2009] HOFERICHTER, Andrea: On a gigawatt course. In: *pv magazine* (2009), Nr. 12, S. 50–53
- [Hou 1994] HOU, Ming: *Verfahren zum automatischen Handhaben und Positionieren labiler Stoffzuschnitte in der Bekleidungsfertigung*. Stuttgart, Universität, Dissertation, 1994
- [Jäger u. a. 2006] JÄGER, Felix ; SCHMUTZ, Wolfgang ; KIENINGER, Michael: *Einrichtung zum Vereinzeln von Substraten vom Stapel, WO 2006/125559 A 1*. 2006
- [Kalinowski 2004] KALINOWSKI, Raimund: Mangelnder Sachverstand erleichtert Auswahl: Sind hydraulische Eigenschaften ein sekundäres Auswahlkriterium für Kreiselumpen? In: *Getränkeindustrie* (2004), Nr. 12, S. 36–40
- [Kaminski u. a. 2009] KAMINSKI, Steffi ; RIETZSCHEL, Romy ; WAGNER, Thomas ; FUNKE, Claudia ; MÖLLER, Hans J.: Multi wire sawing of silicon with thin wires down to 80 mikrometer. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 1299–1304
- [Koch 1992] KOCH, Winfried: *Untersuchungen zum Greifen und Vereinzeln von Zuschnitteilen*. Stuttgart, Universität, Dissertation, 1992
- [Kroeker 1974] KROEKER, Elmer: *Magazin für einen Stapel flacher Gegenstände, DT 24 42 542 A 1*. 1974
- [Landesbank Baden-Württemberg 2009] LANDESBANK BADEN-WÜRTTEMBERG: *Branchenanalyse Photovoltaik*. 2009
- [Larsson u. a. 2008] LARSSON, Hanna ; GUSTAFSSON, Jörgen ; SOLHEIM, Hans J. ; BOSTRÖM, Tobias: The Impact of Saw Damage Etching on Microcracks in Solar Cell Production. In: *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Valencia, 1 - 5 September, 2008, S. 1961–1964
- [Lawrenz u. a. 2006] LAWRENZ, A. ; DAUWE, S. ; SCHULZE, F. W.: Quantitative classification of saw marks of silicon wafers. In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006, S. 1203–1206
- [Lotsch 2009] LOTSCH, H. K. V.: *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments*. Bd. 140. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009

- [Luque und Hegedus 2009] LUQUE, Antonio (Hrsg.) ; HEGEDUS, Steven (Hrsg.): *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Repr. Chichester : Wiley, 2009. – ISBN 0-471-49196-9
- [Martin und Müller 2006] MARTIN, F. ; MÜLLER, A.: Do wafer surface contaminations have effects on solar cell efficiencies? In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006, S. 1375–1376
- [Mayer u. a. 2009] MAYER, Kuno ; KRAY, Daniel ; PÉREZ, Teresa O. ; SCHUMANN, Mark ; GLUNZ, Stefan W.: New surfactants for combined cleaning and texturing of mono-crystalline silicon wafers after wire-sawing. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 1109–1113
- [Mehta 2009] MEHTA, Shyam: *PV Technology, Production and Cost*. 2009
- [Merkwitz u. a. 2006] MERKWITZ, C. ; MÜLLER, A. ; UHLIG, K. ; SEIFERT, C.: The influence of surface treatment on the mechanical surface damage, the mechanical stability and the silicon wafer yield. In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006, S. 1167–1169
- [Meyers 2009] MEYERS, Martin: The race to 1 US-Dollar per W. In: *Photon International* (2009), Nr. 2, S. 74–78
- [Miyazaki u. a. 1996] MIYAZAKI, Takeshiro ; TSUBATA, Yoshikazu ; KAWAKITA, Akio ; KATSUMATA, Noboru ; NAKAYAMA, Akihiro ; HARADA, Toyokazu ; TAKAKU, Mitsuo ; YOSHIDA, Syunso: *Wafer processing system, EP 0 762 483 A1*. 1996
- [Mueller u. a. 2003] MUELLER, André ; CHERRADI, Nabih ; NASCH, Philippe M.: The challenge to implement thin wafer potential with wire saw cutting technology. In: *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. Osaka, 12-16 Mai, 2003, S. 1475–1478
- [Nasch und Sumi 2009] NASCH, Philippe M. ; SUMI, Romain: Meeting current and future wafering challenges. In: *Solid state technology: the international magazine for semiconductor manufacturing* (2009), Nr. 3, S. 34–36
- [Neidlein 2010] NEIDLEIN, Hans-Christoph: An end to stagnation. In: *pv magazine* (2010), Nr. 01, S. 32–35

- [N.N. 2010a] N.N.: *Flachstrahldüsen*. 2010. – URL [http://www.lechler.de/pdf/4\\_flachstrahl\\_d.pdf](http://www.lechler.de/pdf/4_flachstrahl_d.pdf). – Zugriffsdatum: 21.03.2010
- [N.N. 2010b] N.N.: *Hohlkegeldüsen*. 2010. – URL [http://www.lechler.de/pdf/2\\_hohlkegel\\_d.pdf](http://www.lechler.de/pdf/2_hohlkegel_d.pdf). – Zugriffsdatum: 21.03.2010
- [Pohl 2009] POHL, Daniel: Crystalline Silicon PV: An Industry Prepares For New Difficulties. In: *Solar Industry* (2009), Nr. 1, S. 34–35
- [Popov 2009] POPOV, Valentin L.: *Kontaktmechanik und Reibung: Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009
- [Reddig 2007] REDDIG, Kevin: Supply standards. In: *Photovoltaic Fab Managers Forum*.
- [Reddig 2009] REDDIG, Kevin: Overview of automation in the photovoltaic industry. In: *Photovoltaics International* (2009), Nr. 4, S. 18–29
- [Reddig u. a. 2006] REDDIG, Kevin ; FICKERT, Karsten ; JÄGER, Felix: Automatic separation of large and thin wafers. In: *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Dresden, 4-8 September, 2006
- [Reddig und Grimme 2006] REDDIG, Kevin ; GRIMME, Ralf: *Abschlußbericht SplitKontrol*. 2006
- [Rein 2007] REIN, Stefan: Qualitätssicherung und -kontrolle in der Photovoltaikproduktion. In: STADERMANN, Gerd (Hrsg.): *Produktionstechnologien für die Solarenergie*. Hannover, 2007, S. 120–127
- [Renn 2006] RENN, Siegfried: *Vereinzelungsvorrichtung und Verfahren zur stückweisen Bereitstellung plattenförmiger Gegenstände, DE 10 2006 011 870 A 1*. 2006
- [Rentsch u. a. 2009] RENTSCH, Jochen ; ACKERMANN, Rupprecht ; BIRMANN, Katrin ; FURTWÄNGLER, Heike ; HAUNSCHILD, Jonas ; KÄSTNER, Gero ; NEUBAUER, Rainer ; NIEVENDICK, Jan ; OLTERS DORF, Antje ; REIN, Stefan ; SCHÜTTE, Anika ; ZIMMER, Martin ; PREU, Ralf: Wet Chemical Processing for c-Si Solar Cells - Status and Perspectives. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 1113–1117
- [Rogol 2009] ROGOL, Michael: *Solar Annual: Total Eclipse*. 2009



- [Rupnowski und Sopori 2009] RUPNOWSKI, Przemyslaw ; SOPORI, Bhushan: Strength of silicon wafers: fracture mechanics approach. In: *International Journal of Fracture* (2009), Nr. 1, S. 67–74
- [Sarau u. a. 2009] SARAU, G. ; BECKER, M. ; CHRISTIANSEN, S.: Micro-Raman Mapping of Residual Stresses at Grain Boundaries in Multicrystalline Block Cast Silicon Solar Cell Material: Their Relation to the Grain Boundary Microstructure and Recombination Activity. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 969–973
- [Sawada u. a. 1990] SAWADA, Tetsuya ; HOSHIYAMA, Hidetoshi ; YOSHIMOTO, Ikuo ; SOGO, Shini-  
chi: *Blank feeder and method for controlling the same*, EP 0 414 157 A 3. 1990
- [Schade u. a. 2007] SCHADE, Heinz ; KUNZ, Ewald ; KAMEIER, Frank: *Strömungslehre*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin : de Gruyter, 2007 (De Gruyter Lehrbuch)
- [Schneider 2004] SCHNEIDER, Andreas: *Charakterisierungsverfahren und industriekompatible Herstellungsprozesse für dünne multikristalline Siliziumsolarzellen*, Universität Konstanz, Dissertation, 2004
- [Schoenfelder u. a. 2007] SCHOENFELDER, S. ; BOHNE, A. ; BAGDAHN, J.: Comparison of test methods for strength characterization of thin solar wafer. In: *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Mailand, 3-7 September, 2007, S. 1636–1640
- [Schoenfelder u. a. 2008] SCHOENFELDER, S. ; BOHNE, A. ; BAGDAHN, J.: Mechanical strength of mono- and multicrystalline silicon wafers. In: *Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules - Material and Processes*. Vail, Colorado USA, 3-6 August, 2008, S. 187–190
- [Schumann u. a. 2009a] SCHUMANN, M. ; SINGH M. ; ORELLANA PÉREZ T. ; RIEPE S.: Reaching a Kerf Loss Below 100 Mikrometer by Optimizing the Relation between Wire Thickness and Abrasive Size for Multi-Wire Sawing. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009, S. 1222–1228
- [Schumann u. a. 2009b] SCHUMANN, Mark ; PÉREZ, Teresa O. ; RIEPE, Stephan: The solar cell wafering process. In: *Photovoltaics International* (2009), Nr. 5, S. 53–59
- [SEMI 2002] SEMI: *Specifications for Polished Monocrystalline Silicon Wafers*, SEMI M1-0704. 2002

- [SEMI 2008] SEMI: *Specification for silicon wafers for use as photovoltaic cells, SEMI M6-1108*. 2008
- [SEMI PV Group Europe 2010] SEMI PV GROUP EUROPE: *PV Roadmap for Crystalline Silicon*. 2010. – URL [http://www.itrpv.net/doc/roadmap\\_itrpv\\_03\\_2010\\_web.pdf](http://www.itrpv.net/doc/roadmap_itrpv_03_2010_web.pdf). – Zugriffdatum: 02.04.2010
- [Shah 2009] SHAH, Vishal: PV sector outlook: an analyst's perspective. In: *Photovoltaics International* (2009), Nr. 5, S. 172–175
- [Sinke u. a. 2009] SINKE, W. C. ; HOOFF, Wijnand van ; COLETTI, Gianluca ; EHLEN, Boukje ; HAHN, Giso ; REBER, Stefan ; JOHN, Joachim ; BEAUCARNE, Guy ; KERSCHAUER, Emmanuel van ; WILD-SCHOLTEN, Mariska de ; METZ, Axel: wafer-based crystalline silicon modules at 1 Euro/wp: final results from the crystalclear integrated project. In: *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 21-25 September, 2009
- [Sullivan 2004] SULLIVAN, John A.: *Sheet material processing, US 2005/0056991 A 1*. 2004
- [Szimmat 2007] SZIMMAT, Frank: *Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile*. Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2007
- [Treffert 2009] TREFFERT, Claudia: Bloß kein Stress. In: *photovoltaik* (2009), Nr. 12, S. 48–53
- [Truckenbrodt 2008] TRUCKENBRODT, Erich: *Fluidmechanik*. Bd. 1 / E. Truckenbrodt ; Bd. 2: *Elementare Strömungsvorgänge dichteveränderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen*. 4., ergänzte Aufl., Nachdr. in veränderter Ausstattung. Berlin : Springer, 2008
- [VDI 1990] VDI: *Montage- und Handhabungstechnik Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. 1990
- [Verl 2007] VERL, Alexander: Intelligente Antriebs- und Steuerungstechnik ist entscheidendes Alleinstellungsmerkmal. In: *wt Werkstattstechnik online 97* (2007), Nr. 5, S. 300
- [Verl 2010] VERL, Alexander: Endlich steht die Energiefrage auf der Tagesordnung. In: *Interaktiv* (2010), Nr. 2, S. 4

- [Wagemann und Eschrich 2007] WAGEMANN, Hans-Günther ; ESCHRICH, Heinz: *Photovoltaik: Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften /// Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben ; mit 20 Übungsaufgaben*. Wiesbaden : B.G. Teubner Verlag and Vieweg + Teubner, 2007
- [Wang 2006] WANG, Per A.: Industrial challenges for thin wafer manufacturing. In: *Fourth World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Bd. 1. Hawaii, 07.-12. Mai, 2006, S. 1179–1182
- [Wasmer u. a. 2008] WASMER, K. ; BIDIVILLE, A. ; JEANNERET, F. ; MICHLER, J. ; BALLIF, C. ; MEER, M. van der ; NASCH, P. M.: Effects of edge defects induced by multi-wire sawing on the wafer strength. In: *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Valencia, 1 - 5 September, 2008, S. 1305–1310

Inhalt dieser Arbeit ist die Modellierung, Analyse und Bewertung eines Verfahrens, mit welchem Photovoltaikwafer nach dem Sägen mittels Flüssigkeitsstrahlen vereinzelt werden können. Basierend auf einem Versuchstand wird das Modell des 'Vereinzelmehanismus' untersucht. Durch experimentelle Beobachtung und Auswertung werden die Wirkzusammenhänge des Verfahrens wissenschaftlich und technisch verständlich gemacht.

ISBN 978-3-8396-0441-0



FRAUNHOFER VERLAG