

Diplomarbeit

Mikrobearbeitung von Siliziumwafern mit diodengepumpten frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser

Mälzer, Stephanie

Geb. am 04.07.1980 in Werdau

Studiengang Physikalische Technik
Studienrichtung Physikalische Technologien

Westsächsische Hochschule Zwickau (FH)
Fachbereich Physikalische Technik/Informatik
Fachgruppe Physikalische Technik

Betreuer, Einrichtung: Prof. Dr. P. Hartmann, Westsächs. Hochschule Zwickau (FH)
Dipl.-Ing. U. Klotzbach, Fraunhofer IWS, Dresden

Abgabedatum: 01.04.2004

Kurzreferat/Abstract

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist es, Abhängigkeiten und Steigerungsmöglichkeiten von Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität bei der Mikromaterialbearbeitung von Siliziumwafern mit gepulsten Festkörperlaser aufzuzeigen. Dazu kommen Kurzpuls-Nd:YAG-Laser der Wellenlänge 355 nm mit einer Pulswiederholfrequenz von 10 kHz und einer Pulsdauer von 15 ns mit 3 W und 10 W Laserausgangsleistung zum Einsatz. Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen zum Laserstrahlsublimierschneiden behandelt, wichtige werkstofftechnische Aspekte des Halbleitermaterials Silizium näher betrachtet sowie ein Vergleich zu weiteren Trennverfahren von Silizium gezogen. Den Schwerpunkt der Arbeit bildet die Untersuchung der Einflüsse von Laserparametern (Leistung, Polarisation, Frequenz), Werkstoffparametern (Kristallorientierung, Materialdicke, Oberflächenvorbehandlung) und einiger wesentlicher Prozessparameter (Fokuslage, Scangeschwindigkeit, Atmosphärgas) auf das Bearbeitungsergebnis. Dabei erfolgte die Messung der Prozessgeschwindigkeit über das Ausschneiden einer geschlossenen quadratischen Kontur. Zur Beurteilung der Schnittqualität wurden die Schnittfugenbreiten am Strahlein- und Strahlaustritt sowie die Ausdehnung der Hauptablagerungen an geradlinigen Schnitten im Licht-Mikroskop optisch vermessen. Anhand der gewonnenen Abhängigkeiten erfolgte die Auswahl der Einstellungsparameter für eine Steigerung der Schneidgeschwindigkeit (Geschwindigkeitsoptimierung). Es führte eine hohe Laserleistung (10 W), eine hohe Pulsfrequenz (10 kHz), eine hohe Scangeschwindigkeit (300 mm/s) und eine geringe Materialdicke (210 µm) beim Schneiden in einer druckverminderten (0,08 mbar) Heliumatmosphäre mit in Schneidrichtung linear polarisierter Laserstrahlung zu einer maximalen Prozessgeschwindigkeit von ca. 2,1 mm/s; das Resultat entspricht einer Steigerung um den Faktor 8,3 gegenüber dem Schneiden an Luft ohne Parameteroptimierung. Zur zusätzlichen Berücksichtigung der Schnittqualität wird mit der Straf-Ziel-Methode schließlich ein Verfahren zur Suche einer Kompromisslösung beispielhaft vorgestellt.

Einrichtung: Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)
Abt. Laserabtragen und -trennen
Winterbergstraße 28
01277 Dresden

Leitung: Dipl.-Ing. Udo Klotzbach, Gruppenleiter

Aufgabenstellung

Mikrobearbeitung von Siliziumwafern mit diodengepumpten frequenzverdreifachten Nd:YAG-Laser

Danksagung

Für die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit möchte ich mich bei den Mentoren Herrn Udo Klotzbach (Fraunhofer IWS) und Herrn Prof. Dr. Peter Hartmann (FH-Zwickau) bedanken. Für die freundliche Aufnahme und gute Zusammenarbeit sei in diesem Zusammenhang auch allen Mitarbeitern der Gruppe 450 gedankt.

Den Kollegen Herrn Thomas Kuntze und Herrn Frank Sonntag gilt mein besonderer Dank für die Unterstützung bei durchgeführten Versuchen sowie für die Betreuung meiner Arbeit mit der Laseranlage.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Eltern dafür, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht haben und somit die Realisierung meiner Berufsziele unterstützen.

Inhalt

	Seite
Verzeichnis der Abbildungen	7
Verzeichnis der Tabellen	11
Verzeichnis der Formelzeichen	12
Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	14
1 Einleitung	
1.1 Motivation	15
1.2 Ziel der Arbeit/Aufgabenstellung	16
1.3 Stand von Wissen und Technik.....	17
1.3.1 Silizium (Werkstofftechnische Aspekte)	17
1.3.2 Trennverfahren.....	20
1.3.3 Wechselwirkung Laserstrahl-Silizium	24
1.3.4 Allgemeiner Parameterzusammenhang	29
2 Experimentelle Untersuchungen	
2.1 Versuchstechnische Voraussetzungen	32
2.1.1 Versuchsaufbau (Lasermikrobearbeitungsanlage).....	32
2.1.2 Strahlführung (Scanner, Festoptik).....	36
2.2 Bewertungskriterien.....	39
2.2.1 Schneidgeschwindigkeit	39
2.2.2 Schnittqualität.....	40
2.3 Einfluss von Werkstoffeigenschaften.....	42
2.3.1 Kristallorientierung.....	42
2.3.2 Materialdicke	45
2.3.3 Oberflächenrauigkeit	50
2.4 Einfluss von Laserparametern.....	53
2.4.1 Polarisation.....	53
2.4.2 Leistung	58

2.4.3	Pulswiederholffrequenz	61
2.5	Fokuslage	65
2.6	Scantechnologie (Scangeschwindigkeit)	69
2.6.1	Scanner	70
2.6.2	Festoptik (Tisch)	73
2.6.3	Auswertung	76
2.7	Einfluss der Gasatmosphäre	78
2.7.1	Luft	81
2.7.2	Argon	83
2.7.3	Helium	86
2.7.4	Vakuum	87
2.7.5	Auswertung	90
2.8	Optimierte Parameter	91
2.9	Diskussion (Straf-Ziel-Methode)	94
3	Zusammenfassung/Ausblick	104
	Literaturverzeichnis	107

Anhang

	Seite
Anhang A Messergebnisse (tabellarisch)	
A.1 Messwerte zur Untersuchung der Materialdickenabhängigkeit.....	113
A.2 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Kristallorientierung	113
A.3 Messwerte zur Untersuchung des Oberflächeneinflusses	114
A.4 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Polarisationsrichtung	114
A.5 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Laserleistung.....	115
A.6 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Pulswiederhol- frequenz	115
A.7 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Defokussierung	116
A.8 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Scangeschwindigkeit (Scannersteuerung).....	117
A.9 Messwerte zur Untersuchung in einem engeren Geschwindigkeits- fenster; $v_{scan} = (0,1-20)$ mm/s	117
A.10 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Verfahrensgeschwin- digkeit (Tischsteuerung).....	118
A.11 Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Gasatmosphäre.....	118
A.12 Minimale und maximale effektive Schneidgeschwindigkeiten.....	119
A.13 Messwerte zur Untersuchung mit optimierten Parametern	119
 Anhang B Vergleich der Trennverfahren (tabellarisch).....	 120
 Anhang C REM-Bilder	
C.1 Bilder für Luft	121
C.11 SE-Bild (Strahleintritt) an Luft.....	121
C.12 RE-Bild (Strahleintritt) an Luft.....	121
C.13 Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) an Luft	121
C.2 Bilder für Argon	122
C.21 SE-Bild (Strahleintritt) in Argon	122
C.22 RE-Bild (Strahleintritt) in Argon	122
C.23 Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Argon	122
C.3 Bilder für Helium	123
C.31 SE-Bild (Strahleintritt) in Helium.....	123

C.32	RE-Bild (Strahleintritt) in Helium.....	123
C.33	Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Helium.....	123
C.4	Bilder für Vakuum	124
C.41	SE-Bild (Strahleintritt) in Vakuum.....	124
C.42	RE-Bild (Strahleintritt) in Vakuum.....	124
C.43	Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Vakuum.....	124
Anhang D	Formeln zur Fehlerberechnung	125
Anhang E	Programm Quellcodes	
E.1	Programm "square"	126
E.2	Programm "lines"	129
Anhang F	Veröffentlichung	
	"Influence of gas on cutting silicon with solid state laser"	132

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abbildung 1.1 Das fcc-Gitter und die Kristallstruktur des Siliziums (Diamantgitter)	17
Abbildung 1.2 Die wichtigsten Kristallebenen	18
Abbildung 1.3 Das Absorptionsspektrum von Silizium	19
Abbildung 1.4 Physikalische Prozess-/ Verfahrensparameter bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung	24
Abbildung 1.5 Verschiedene Phasen des Sublimationsabtragens mit Laserstrahlung	25
Abbildung 1.6 Bändermodell eines Halbleiters im Vergleich zum Metall und Isolator; vollständig gefülltes Valenzband und leeres Leitungsband, Trennung beider Bänder durch Bandlücke	26
Abbildung 1.7 Schematische Anordnung zur Materialbearbeitung mittels Laser	29
Abbildung 2.1 Lasermikrobearbeitungsanlage	32
Abbildung 2.2 Strahlführung	32
Abbildung 2.3 Vergleich Planfeldobjektiv und Standardobjektiv	33
Abbildung 2.4 Strahlanalyse	35
Abbildung 2.5 Vakuumkammer mit Druckmessgerät	36
Abbildung 2.6 Probenkammer mit Probe	36
Abbildung 2.7 Grundprinzip Vektorablenkung	37
Abbildung 2.8 Schreibweise beim Vektorverfahren am Beispiel des Buchstaben "A"	38
Abbildung 2.9 Einflussfaktoren beim Schneidvorgang	39
Abbildung 2.10 effektive Schneidgeschwindigkeit	43
Abbildung 2.11 effektive Schneidgeschwindigkeit logarithmisch	44
Abbildung 2.12 Schnittfugenbreiten und Wandwinkel	44
Abbildung 2.13 Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahleintritt)	45
Abbildung 2.14 Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahlaustritt)	45
Abbildung 2.15 effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <111>-Wafer	47
Abbildung 2.16 effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <100>-Wafer	47
Abbildung 2.17 Schnittfugenbreiten und Wandwinkel beim <111>-Wafer	48
Abbildung 2.18 Schnittfugenbreiten und Wandwinkel beim <100>-Wafer	48

Abbildung 2.19	Schnittfugenbreite am Strahleintritt für <100>-Silizium beim Schneiden parallel zum Flat (0°)	49
Abbildung 2.20	Schnittfugenbreite am Strahleintritt für <100>-Silizium beim Schneiden diagonal zum Flat (45°)	49
Abbildung 2.21	schmale Schnittfuge am Strahleintritt für <100>-Silizium.....	49
Abbildung 2.22	schmale Schnittfuge am Strahleintritt für <111>-Silizium.....	49
Abbildung 2.23	breite Schnittfuge am Strahleintritt für <100>-Silizium	50
Abbildung 2.24	breite Schnittfuge am Strahleintritt für <111>-Silizium	50
Abbildung 2.25	Schnittfugenbreite am Strahleintritt für die geschliffene/geätzte Oberfläche.....	51
Abbildung 2.26	Schnittfugenbreite am Strahleintritt für die polierte Oberfläche.....	51
Abbildung 2.27	Schnittfugenbreite am Strahlaustritt für die geschliffene/geätzte Oberfläche.....	52
Abbildung 2.28	Schnittfugenbreite am Strahlaustritt für die polierte Oberfläche.....	52
Abbildung 2.29	Orientierung der Polarisationsrichtung zur Schneidrichtung (schematisch)	53
Abbildung 2.30	Schneidgeschwindigkeiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung	54
Abbildung 2.31	Schnittfugenbreiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung	55
Abbildung 2.32	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 0°) für linear polarisierte Laserstrahlung	56
Abbildung 2.33	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 0°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung	56
Abbildung 2.34	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei vertikaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 90°) für linear polarisierte Laserstrahlung	56
Abbildung 2.35	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei vertikaler Strahlablenkung (Strahlablenkwinkel 90°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung	56
Abbildung 2.36	Wandwinkel für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung.....	57
Abbildung 2.37	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) für 3 W Laserleistung.....	59
Abbildung 2.38	Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) für 10 W Laserleistung.....	59
Abbildung 2.39	Schnittfugenbreiten und Ablagerungen (Strahlaustritt) für 3 W Laserleistung.....	59
Abbildung 2.40	Schnittfugenbreiten und Ablagerungen (Strahlaustritt) für 10 W Laserleistung.....	59

Abbildung 2.41	Ablagerungen (Strahleintritt) für für 3 W Laserleistung	60
Abbildung 2.42	Ablagerungen (Strahleintritt) für für 10 W Laserleistung	60
Abbildung 2.43	Schneidgeschwindigkeit	62
Abbildung 2.44	Schnittfugenbreiten und Wandwinkel	62
Abbildung 2.45	Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahleintritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederholffrequenz	63
Abbildung 2.46	Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahlaustritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederholffrequenz	63
Abbildung 2.47	effektive Schneidgeschwindigkeit	66
Abbildung 2.48	Schnittfugenbreite und Wandwinkel	66
Abbildung 2.49	Schnittfugen (Strahleintritt) in Abhängigkeit von der Defokussierung	67
Abbildung 2.50	Schnittfugen (Strahlaustritt) in Abhängigkeit von der Defokussierung	67
Abbildung 2.51	effektive Schneidgeschwindigkeit mit Scanneroptik	70
Abbildung 2.52	effektive Schneidgeschwindigkeit in engerem Geschwindigkeits- fenster; $v_{scan} = (0,1-20)$ mm/s	71
Abbildung 2.53	Schnittfugenbreite und Wandwinkel	72
Abbildung 2.54	Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Scan- geschwindigkeit	72
Abbildung 2.55	Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Scan- geschwindigkeit	73
Abbildung 2.56	effektive Schneidgeschwindigkeit	74
Abbildung 2.57	Schnittfugenbreite und Wandwinkel	74
Abbildung 2.58	Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Verfah- geschwindigkeit	75
Abbildung 2.59	Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Verfah- geschwindigkeit	75
Abbildung 2.60	effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Relativ- geschwindigkeit für Scanner- und Tischsteuerung	78
Abbildung 2.61	effektive Schneidgeschwindigkeit	80
Abbildung 2.62	Schnittfugenbreiten und Wandwinkel	80
Abbildung 2.63	Ablagerungen am Strahleintritt für die verschiedenen Prozessgase	81
Abbildung 2.64	Ablagerungen am Strahlaustritt für die verschiedenen Prozessgase	82
Abbildung 2.65	Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Luft	82
Abbildung 2.66	Quantitative EDX-Analyse der Schmelzablagerungen (Strahleintritt) für Luft	83
Abbildung 2.67	Schnittfugen (Strahleintritt) für die verschiedenen Prozessgase	84

Abbildung 2.68	Schnittfugen (Strahlaustritt) für verschiedene Prozessgase	84
Abbildung 2.69	Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Argon	85
Abbildung 2.70	Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Argon.....	85
Abbildung 2.71	Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Helium.....	86
Abbildung 2.72	Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Helium	87
Abbildung 2.73	Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Vakuum.....	88
Abbildung 2.74	Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Vakuum	89
Abbildung 2.75	Waferoberfläche (Strahleintritt) für Vakuum	89
Abbildung 2.76	Abhängigkeit der Laserleistung von der Pulsfrequenz.....	92
Abbildung 2.77	Schnittfuge (Strahleintritt) für optimierte Parameter bei ca. 1 bar	94
Abbildung 2.78	Schnittfuge (Strahlaustritt) für optimierte Parameter bei ca. 1 bar	94
Abbildung 2.79	Schnittfuge (Strahleintritt) für optimierte Parameter bei 0,08 mbar	94
Abbildung 2.80	Schnittfuge (Strahlaustritt) für optimierte Parameter bei 0,08 mbar	94
Abbildung 2.81	Straf-Ziel-Methode schematisch.....	96
Abbildung 2.82	Wichtung der Geschwindigkeit.....	98
Abbildung 2.83	Wichtung der Schnittfugenbreite (Strahleintritt)	99
Abbildung 2.84	Wichtung der Schnittfugenbreite (Strahlaustritt)	99
Abbildung 2.85	Wichtung des Wandwinkels	100
Abbildung 2.86	Wichtung der Ablagerungen (Strahleintritt)	101
Abbildung 2.87	Straf-Ziel-Methode a) Ziel: höchste Schneidgeschwindigkeit b) Ziel: beste Schnittqualität	101

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tabelle 1.1	Daten von Silizium (Kristalleigenschaften, thermische, elektrische/ dielektrische Eigenschaften) 20
Tabelle 2.1	wichtige Laser-Spezifikationen/Daten 33
Tabelle 2.2	wichtige Daten zur Fokussierung 34
Tabelle 2.3	Prinzipdarstellung/Daten der optischen Leistungsübertragung..... 36
Tabelle 2.4	Vergleich von Verfahren zur Erzeugung der Relativbewegung Laserstrahl – Werkstück..... 38
Tabelle 2.5	Übersicht zu Ionisierungsenergie und Wärmeleitfähigkeit eingesetzter Gase..... 79
Tabelle 2.6	Optimierte Parameter 93

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	SI-Einheit	Beschreibung
a	[Å]	Gitterkonstante
α	[m ⁻¹]	Absorptionskoeffizient
α	[°]	Flankenwinkel/ Wandwinkel
d_L, d_0, d_f	[m]	Strahldurchmesser (auf der Fokussieroptik), Taillendurchmesser, Fokusbereich
ϵ_{Str}	[J m ⁻¹]	normierte Streckenenergie
F	[]	Fokussierzahl
f	[m]	Brennweite
f_{Rep}	[Hz]	Pulsfolgefrequenz (Repetitionsrate)
I, I_0	[W m ⁻²]	mittlere Leistungsdichte (Intensität), Leistungsdichte der Strahltaille
k_i	[]	Bewertungsfaktor einer Größe i
κ	[S m ⁻¹]	elektrische Leitfähigkeit
l_a	[m]	optische Eindringtiefe (Absorptionslänge)
λ, λ_{gr}	[m]	Wellenlänge, Grenzwellenlänge
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit
n	[]	Brechzahl
n	[]	Anzahl Überfahrten
P_L, P_{AV}, P_W	[W]	Laserleistung, mittlere Leistung, mittlere Leistung am Werkstück
r, r_F, r_0	[m]	Strahlradius, Fokusradius, Taillenradius
s	[m]	Schneiddicke/ Materialdicke
s_{Kontur}	[m]	Schnittlänge/ Konturlänge
τ, τ_x	[]	Transmissionsgrad, Transmissionsgrad des Elementes x
t_{Scan}	[s]	Überfahrdauer
Θ, Θ_L	[rad]	Divergenzwinkel, Divergenzwinkel der Fokussieroptik
v_{eff}, v_{Scan}	[m s ⁻¹]	effektive Schneidgeschwindigkeit, Scangeschwindigkeit/ Vorschubgeschwindigkeit
w, w_0	[m]	Strahlradius, Taillenradius
$w_0 \Theta/2$	[m·rad]	Strahlparameterprodukt
w_{SE}, w_{SA}	[m]	mittlere Schnittfugenbreite am Strahlein-/ austritt
W_g	[J, eV]	Energie des Bandabstandes (gap)
W_{Ph}	[J, eV]	Photonenenergie

z_f	[m]	Fokuslage relativ zur Werkstückoberfläche
z_R	[m]	Rayleigh-Länge

Konstanten

$c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	Elementarladung
$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	PLANCK-Konstante (PLANCKsches Wirkungsquantum)
$\pi = 3,141592653589$	LUDOLFsche Zahl

Indices

0	Bezugswert (Wert der Strahltaile)
a	Absorption
α	Flankenwinkel/ Wandwinkel
av.	average (Mittelwert)
eff.	Effektivwert
f, F	Fokus
g	gap (Bandlücke)
gr.	Grenzwert
Ist	Istwert
k	Kerfbreite
Kontur	Kontur
L	Laser
L	Linse
Ph.	Photon
Rep.	Repetition (Wiederhol~)
SA	Strahlaustritt
scan	Überfahr~
SE	Strahleintitt
Soll	Sollwert
Str.	Strecke
v	Geschwindigkeit
w	Schnittfugenbreite
W	Werkstück

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

AFM	Atomic Force Microscopy (Raster-Kraft-Mikroskopie)
CAD	Computer Aided Design
CH ₃ COOH	Ethansäure (Essigsäure)
CNC	Computerized Numerical Control
cw	continuous wave (Dauerstrich)
DBG	Dicing before Grinding
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energy-dispersive-X-ray
EN	Europäische Norm
fcc	face-centered cubic (kubisch flächenzentriert)
HF	Hydrogenfluorid/Fluorwasserstoffsäure (Flusssäure)
HNO ₃	Salpetersäure
IC	Integrated Circuit
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
KDP	Kaliumdihydrogenphosphat
KOH	Kaliumhydroxid (Kalilauge)
NC	Numerical Control
Nd:YAG	Neodym dotierter Yttriumaluminiumgranatkristall
OG	Oberer Grenzwert
Q-switch	Quality-switch (Güteschalter)
RE-Bild	Rückstreuelektronen-Bild
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE-Bild	Sekundärelektronen-Bild
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TEM ₀₀	Transversal Electromagnetic Mode
UG	Unterer Grenzwert
UFP	Ultra Fine Particles
UV	Ultraviolett
WEZ	Wärmeeinflusszone

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit nunmehr über 30 Jahren wird der Laser als Werkzeug zur Bearbeitung von Werkstoffen eingesetzt. Dabei gewann er in den letzten Jahren für die Mikroverfahrenstechnik und Mikromaterialbearbeitung speziell in der Halbleiterindustrie zunehmend an Bedeutung. Diese Aussage wird durch verschiedene Anwendungsformen gestützt. Zu diesen gehören u.a.:

- das Abgleichen (Trimmen) elektrischer Dünn- und Dickschichtwiderstände durch feine Laserschnitte in der Widerstandsschicht (Laserstrahltrennen),
- die Erzeugung von Kanalstrukturen durch scannenden Abtrag in Kunststoffen zur Herstellung von Prototypen für Mikrofluidiksysteme und Mikroreaktoren (Laserstrahlmikrostrukturierung),
- das Laserlöten von Mikrobauteilen an eine Trägerschicht oder
- das Laser-Mikroschweißen zur Herstellung von metallischen Mikrostrukturapparaten wie Mikrowärmeüberträger und Mikrovermischer (Laserstrahlmikrofügen).

Die aufgelisteten Beispiele sind als Beleg für eine starke Präsenz des Lasers in vielen industriellen Bereichen der Mikrotechnik zu werten.[4,8,21,25]

Als Gründe für diese Entwicklung gelten die wiederholt aufgezeigten Vorteile des Lasers als Präzisionswerkzeug für die Feinbearbeitung. Besonders hervorzuhebende Eigenschaften sind der hohe Grad an Flexibilität sowie die berührungslose und somit Kräfte- und Verschleißfreie Bearbeitungsweise. Hinzu kommen umfangreiche Möglichkeiten der Automatisierbarkeit, die einfache Integration in bestehende Fertigungslinien sowie die wichtige Fähigkeit einer multi-direktionalen (zwei- oder mehr-dimensionalen) Bearbeitung. Dieses Vermögen, jede beliebige Kontur (Löcher, Schlitze, T-Schnitte etc.) ausschneiden zu können, macht den Laser auch für die Chiptrennung im Bereich der Herstellungs- und Verbindungstechnik zu einem ernst zu nehmenden Konkurrenten konventioneller Technologien.[11,12,27]

Im Zeitraum von mehr als 20 Jahren hat sich der Prozess des Wafersägens mit Hochgeschwindigkeits-Diamantsägen bewährt. Dessen Anwendung dient dem Separieren der gleichzeitig in großer Stückzahl auf dem Wafer hergestellten Mikrokomponenten (Batch Processing).

Mit dem Trend zu immer dünneren Wafern (Dicke ca. 50 μm), höherer Packungsdichte und damit geringeren Strukturbreiten sowie steigenden Anforderungen an die Schnittqualität, stößt diese Technik an ihre Grenzen. Infolge der unvermeidlichen Kraftwirkungen während des Sägens und der daraus resultierenden hohen mechanischen Spannungen kommt es zur Entstehung von Materialdefekten wie Ausbrüchen bzw. Abplatzungen (chipping) und Mikro-

rissen besonders an den oberen und unteren Kanten der Wafer. Dies kann im Falle sehr dünner Wafer zu Beschädigungen führen. Weitere Probleme bestehen darin, dass eine konstante Schnittqualität sowie eine zuverlässige Vorhersage über die Sägeblattlebensdauer aufgrund des Verschleißes nicht möglich sind. Als nachteilig erweist sich ferner die Kristallorientierungsabhängigkeit der Rissbildung, welche als Ursache für eine Qualitätsverschlechterung beim Schneiden quer zu den Kristallebenen in Betracht kommt. Eine andere Schwierigkeit resultiert aus der Behinderung des Abtrags durch das Zusetzen von Sägeblättern beim Schneiden von Materialien mit vorwiegend metallischem Schichtmaterial (Kupfer-Schaltkreise) aufgrund der feinen Körnung des Werkzeuges. Diese Problematik konnte durch das DBG-Verfahren der Firma DISCO gelöst werden. Mit Hilfe eines Kurzpulslasers werden dabei die Sägestraßen zunächst angeritzt und anschließend im Zuge des Wafersägens durchtrennt. Diese Technologie verfolgt die Ziele: Reduzierung von Ausbrüchen, Vermeidung von Schicht-Ablösungen sowie Erhöhung der Produktivität (Säge-Durchsatz). [16,23,31,34,37,39,41]

Wenngleich das Verfahren des Wafersägens mit grundsätzlichen Problemen behaftet ist, präferiert die Mehrzahl von Herstellern der Halbleiterindustrie bislang (noch) nicht das laser-gestützte Wafer-Dicing. Gründe hierfür sind die zum Teil noch relativ niedrige Schneidgeschwindigkeit, welche ein effizientes Durchtrennen mittels Laser nur bei sehr dünnen Wafern zuließ, und die wegen lokaler Erwärmung bei nahezu kalter Umgebung noch unzureichende Schnittqualität. Die Anwendung von Hochleistungs-Kurzpuls- und Ultra-Kurzpulslaser mit Wellenlängen im UV-Bereich soll bei Optimierung der Prozessparameter zu einer signifikanten Qualifizierung des Verfahrens führen.

1.2 Ziel der Arbeit/Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, den Einfluss verschiedener Laser- und Prozessparameter beim Mikroschneiden von monokristallinem Silizium in Form industrierelevanter Wafer zu untersuchen. Diese Untersuchungen sollen Lösungswege zur Steigerung von Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität aufzeigen. Gleichzeitig soll das Leistungsvermögen des Lasermikroschneidens im Vergleich zu anderen Trennverfahren (z.B. Wafersägen, Wasserstrahlschneiden) charakterisiert werden. Basierend auf praktischen Untersuchungen sind Aussagen zu variablen Laserparametern (Leistung, Polarisation, Frequenz), Werkstoffeigenschaften (Kristallorientierung, Materialdicke) sowie Prozesskenngößen (Fokuslage, Scan- und Schnitttechnologien, Gaseinfluss) zu treffen und in einen Kontext zu den erzielbaren Ergebnissen (Schnittgeschwindigkeit, Schnittqualität) zu stellen.

1.3 Stand von Wissen und Technik

1.3.1 Silizium (Werkstofftechnische Aspekte)

Silizium ist heute als Substratmaterial wichtigster Basiswerkstoff der Halbleiterindustrie. Mehr als 97% aller Einzel-Bauelemente (discrete devices) und integrierten Schaltkreise (IC) werden über bestimmte Planartechniken¹⁾ auf der Oberfläche einer dünnen einkristallinen Siliziumscheibe (wafer) hergestellt.[1,19] Siliziumeinkristalle werden in Form von Stäben aus Quarzsand (Siliziumdioxid) im Kristallziehverfahren je nach Verwendungszweck in unterschiedlichen Kristallrichtungen hergestellt (<100>-, <111>-Richtung). Sie besitzen durch das Fehlen von Korngrenzen ein wesentlich besseres elektrisches Verhalten als beispielsweise polykristallines Silizium. Ihre elektrische Leitfähigkeit liegt bei Raumtemperatur zwischen der eines Leiters mit geringer Leitfähigkeit ($\sigma \sim 10^5$ S/cm) und der eines Isolators ($\sigma \leq 10^{-14}$ S/cm). Im Unterschied zu den elektrischen Eigenschaften von Silizium, welche bezüglich der Raumrichtungen als isotrop zu bezeichnen sind, führen seine anisotropen physikalischen und chemischen Eigenschaften zu folgendem mechanischen Verhalten: bei Bruch springt es bevorzugt entlang wenig besetzter Kristallebenen.[1]

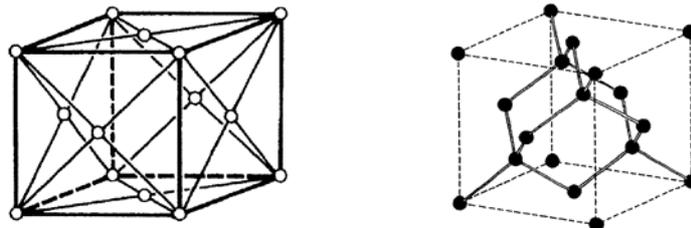


Abbildung 1.1: Das fcc-Gitter und die Kristallstruktur des Siliziums (Diamantgitter) [13]

¹⁾ Durchführung aller Prozessschritte ganzflächig auf der Oberfläche einer dünnen Siliziumscheibe [13]

Entsprechend seiner Vierwertigkeit (4 Außenelektronen) kristallisiert Silizium im kubisch flächenzentrierten Gitter (fcc) mit der Gitterkonstanten $a = 0,357$ nm ($3,57 \text{ \AA}$). Jedes Atom besitzt vier äquidistante nächste Nachbaratome, mit denen es über kovalente Bindungen verbunden ist. Diese sind somit in Form einer Tetraederstruktur angeordnet.[1] Die typische Kristallstruktur eines Diamantgitters ergibt sich demnach durch die Ineinanderschachtelung zweier solcher fcc-Gitter, welche um $\frac{1}{4}$ der Raumdiagonalen gegeneinander verschoben sind (Abbildung 1.1).[13] Aufgrund des Unterschiedes der Abstände zwischen den Eckpunk-

ten der beiden ineinandergeschachtelten Gitter und der zu dem nächsten flächenzentriert sitzenden Atom, existieren verschieden dicht gepackte Kristallebenen, welche häufig die Geometrie der Struktur - z.B. bei anisotropen nasschemischen Ätzprozessen - festlegen.[33]

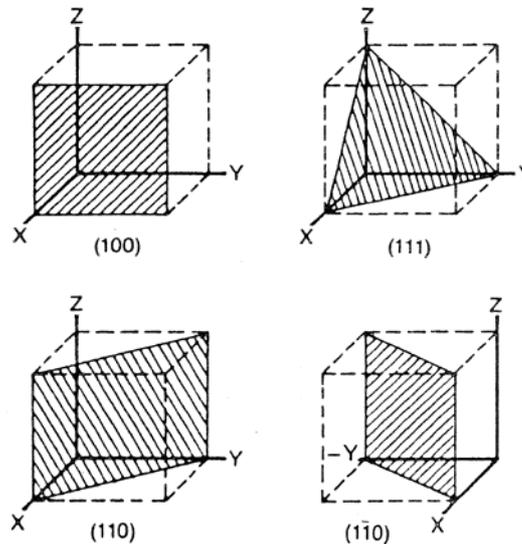


Abbildung 1.2: Die wichtigsten Kristallebenen [20]

Die wichtigsten Kristallebenen [1,33] dabei sind (*Abbildung 1.2*):

- **{100}-Ebenen**
Waferoberfläche, Flächendichte: 2 Atome pro Elementarzelle (entspricht ca. $6,8 \cdot 10^{14}$ Atomen/cm²), Bindungen quer zur $\langle 100 \rangle$ -Spalt-Richtung am geringsten,
- **{110}-Ebenen**
Waferoberfläche, Flächendichte: 4 Atome pro Elementarzelle (entspricht ca. $9,6 \cdot 10^{14}$ Atomen/cm²),
- **{111}-Ebenen**
am dichtesten gepackt (Atomdichte: $1,57 \cdot 10^{15}$ Atome/cm²), wächst und ätzt in $\langle 111 \rangle$ -Richtung stets am langsamsten („Ätzstoppebenen“)

Die für die Lasermaterialbearbeitung von Silizium wichtigsten materialspezifischen Kenngrößen sind der Absorptionsgrad, die Wärmeleitfähigkeit sowie des weiteren die charakteristischen Umwandlungstemperaturen und -energien (Schmelz- und Verdampfungswärme).[10] In *Abbildung 1.3* wird das spektrale Absorptionsverhalten von Silizium dargestellt. Es besteht eine starke Wellenlängen(λ)-Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten für Silizium.[17] Die Absorptionskante, die sich aus dem Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband ergibt, liegt bei $\lambda_{gr} = 1,107$ nm. Für infrarote Strahlung ist Silizium durchsichtig, absorbiert sichtbares Licht und besitzt ein Absorptionsmaximum für Wellenlängen im UV-Bereich.[33]

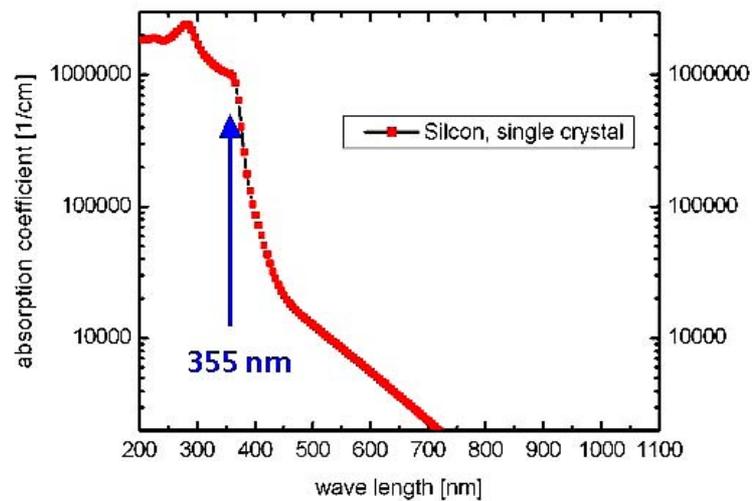


Abbildung 1.3: Das Absorptionsspektrum von Silizium [Quelle: Fraunhofer IWS]

Dabei zeichnet sich Silizium durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, die mit jener von Metallen vergleichbar ist [33], aus *Tabelle 1.1* sind u.a. Kenngrößen thermischer Eigenschaften zu entnehmen.

Tabelle 1.1: Daten von Silizium (Kristalleigenschaften, thermische, elektrische/dielektrische Eigenschaften) [1,2,33,45,46]

Parameter	Wert
Elementname (Symbol)	Silizium (Si)
Gitterkonstante [Å]	5,43095
Atomdichte [cm^{-3}]	$5,0 \cdot 10^{22}$
Atomgewicht [g mol^{-1}]	28,086
Dichte [g cm^{-3}]	2,328
spez. Gewicht [g cm^{-3}]	2,34
Schmelztemperatur [°C]	1415
Siedetemperatur [°C]	2680
Schmelzwärme [J g^{-1}]	1650
Verdampfungswärme [J g^{-1}]	13700
spez. Wärmekapazität [$\text{J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$] (bei 25°C)	0,703

Wärmeleitfähigkeit [$W\ cm^{-1}\ K^{-1}$]	0,8 -1,5
Wärmeleitfähigkeit [$W\ cm^{-1}\ ^\circ C^{-1}$] (bei 300 K)	1,5
Dampfdruck [Pa] (bei 1650 °C)	1
Dampfdruck [Pa] (bei 760 °C)	10^{-6}
Therm. Ausdehnungskoeffizient [$^\circ C^{-1}$]	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Thermischer Diffusionskoeffizient [$cm^2\ s^{-1}$]	0,9
Bandabstand (energy gap) [eV] (bei 0 K)	1,17
Bandabstand (energy gap) [eV] (bei 300 K)	1,12
Dielektrizitätskonstante []	11,9

1.3.2 Trennverfahren

Die für die Mikroelektronik auf Siliziumscheiben (wafer) im Batch Processing hergestellten Einzelchips, müssen für die weitere Verarbeitung (Endmontage, Packaging) separiert werden. Zweck des Separierens ist es, den Waferverband in einzelne Chips (Dice) aufzutrennen.[32] Das Waferlayout sieht dafür einen ca. 50 - 100 μm breiten umlaufenden Ritzrahmen vor, der die einzelnen Chips eines Wafers voneinander abgrenzt. Innerhalb dieses Ritzrahmens befinden sich außer Teststrukturen zur Parametererfassung keine relevanten Schaltungsteile, da der Bereich beim Zerlegen der Wafer irreversibel zerstört wird.[13] Daraus folgt, dass bewegliche Strukturen blockiert und Strömungskanäle durch Verunreinigungen (Sägestaub, Splitter) verstopft werden können. Membranen feiner Strukturen sind durch Erschütterungen und Spülwasser gefährdet. Damit ist das Separieren ein äußerst kritischer Verfahrensschritt auf dem Gebiet der Mikrostrukturierung.[32]

Zum Zweck der Trennung existieren neben dem Laserstrahlschneiden noch einige andere, zum Teil ältere Verfahren wie das Sägen oder Trennschleifen (dicing) und das Ritzen mit anschließendem Brechen. Neue Verfahren - meist Anwendungen einer Form des Laserstrahlschneidens - sind der sogenannte Laser-MicroJet® der Firma Synova SA und die Laserbearbeitung nach dem Prinzip der Firma ALSI. Nachfolgend sollen die wichtigsten Technologien kurz vorgestellt und in Form einer tabellarischen Gegenüberstellung (*Anhang B*) verglichen werden.

Sägen (Trennschleifen)

Das Sägen oder Trennschleifen ist eine mechanisch abrasive Bearbeitungsform. Seit Beginn der Mikrochipfertigung hat sie sich als Standardverfahren der Mikrosystemtechnik etabliert. Das Heraustrennen der einzelnen Dice erfolgt hierbei mechanisch nach dem Raster-Verfahren. Verwendet wird dazu eine Scheibensäge (Außensäge) deren Durchmesser aus Stabilisierungsgründen gering bemessen ist. Das an der Peripherie mit Diamantstaub beschichtete Sägeblatt wird dabei in definierter Eintauchtiefe und mit hoher Drehzahl (ca. 30.000 U/min.) entlang der Ritzrahmen auf der in einem Ringhalter eingespannten und über

einen x/y-Positioniertisch ausgerichtetes Scheibe geführt. Zur Vermeidung der Fortbewegung gesägter Einzelstücke sowie der Positionsveränderung der Chips (und damit deren Lage auf der Scheibe) wird zur Fixierung des Wafers auf der Waferauflage (chuck) eine spezielle selbsthaftende Klebefolie verwendet. Während der gesamten Bearbeitung fließt kontinuierlich Wasser über den Wafer. Dies erfolgt zur Kühlung der Schleifscheibe bei gleichzeitiger Entfernung des Sägestaubs.[1,13, 32, 39,40]

Ritzen und Brechen

Der grundlegende Effekt bei dem heute eher weniger gebräuchlichen Trennverfahren des Anreißens und anschließenden Brechens besteht in der Erzeugung großer mechanischer Spannungen (Gitterspannungen) im Ritzrahmen zwischen den Chips infolge einer mechanischen, thermischen oder chemischen Beschädigung des Kristalls. Das Ritzen selbst kann auf sehr unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden:

1. mit einer Diamantspitze, die unter leichtem Druck in der Ritzrahmenmitte entlanggeführt wird (Entstehung eines einige Mikrometer tiefen V-förmig aufgerissenen Grabens mit Tiefenrissen in der Scheibenoberfläche) [1,13]
2. mit der Wafersäge, welche den Wafer bis auf eine Restdicke durchtrennt (half-cut) [13]
3. per Laser, der infolge des intensiven, stark fokussierten Schreibstrahls (Wellenlänge: ca. 1 μm , Eindringtiefe: 100 μm – 200 μm) das Halbleitermaterial entlang des Ritzrahmens erhitzt und kurzzeitig aufschmilzt (Entstehung von Defektzonen durch Rekristallisation zu polykristallinem Silizium beim Erstarren) [1,13]
4. durch Ätzen von Gräben in den Siliziumwafer bei <100>-Wafers (Entstehung von durch die <111>-Ebenen des Siliziumeinkristalls begrenzten V-Gräben) [8]

Während der Bearbeitung haftet hier ebenfalls die Scheibe mittels einer selbstklebenden Folie auf der Waferauflage (chuck). Anschließend erfolgt deren Positionierung über einer Kante bzw. gewölbten Oberfläche um mittels Andrücken die Trennung herbeiführen zu können. Aufgrund der mechanischen Belastung springt die Scheibe entlang der Ritzlinien und zerbricht in einzelne Chips.[1,13]

Wasserstrahlgeführter Laser (Laser-MicroJet®)

Bei dem sogenannten Laser-MicroJet® handelt es sich um eine Materialbearbeitungsmethode, welche aus der Weiterentwicklung des Prinzips vom lichtleitenden Wasserstrahl durch die Fa. Synova SA und die Eidgenössisch-Technische Hochschule Lausanne, Schweiz hervorgegangen ist. Hierbei werden die Verfahrensvorteile des Schneidens mit Wasserstrahl (kalt, großer Arbeitsabstand) mit jenen des Laserstrahlschneidens (präzise, schnell) kombi-

niert. Dabei ist der eigentliche Schneidprozess als Laser-basiert anzusehen: Ein i.a. gepulster Laserstrahl wird fokussiert und mit einem bis zu 50 µm dünnen laminaren Wasserstrahl durch eine Düse abgegeben. Das Laserlicht wird infolge Totalreflexion an der Wasser-Luft-Grenzfläche analog einer optischen Lichtleitfaser auf das Werkstück geleitet. Eine weitere Fokussierung des nun mit dem Wasserstrahl mitgeführten Parallelstrahls ist damit nicht nötig. Der Vorteil des kontinuierlich fließenden Wasserstrahls liegt hauptsächlich in dem ständigen Kühlen der Schnittfuge. Damit werden nachteilige thermische Effekte zwischen den Laserpulsen vermieden. Des weiteren kommt es infolge Aufnahme und Abtransport von verdampftem Material nicht zu ungewollten Materialablagerungen auf der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks. Dessen Fixierung erfolgt auch hier mittels eines speziell entwickelten Laser-Tape.[23,31,37]

Laserholographie

Zu betrachten ist hier die Laserbearbeitung nach dem Prinzip der Firma ALSI (Advanced Laser Separation Int., Niederlande). Dieses patentierte Verfahren wurde bislang nur in geringem Maße bekannt. Es basiert auf der Splittung des Laserstrahls mit Hilfe eines holographischen Gitters in mindestens zwei, ggf. aber bis zu zehn Einzelstrahlen entsprechend niedrigerer Leistung. Durch das dicht aufeinanderfolgende Abfahren des gleichen Weges infolge der einzelnen Teilstrahlen nacheinander, wird der Abtrag stufenweise erreicht. Der Schnitt soll dabei tiefer ausfallen wie bei der Bearbeitung mit einem einzigen Laserstrahl gleicher Ausgangsleistung.[38]

Laserstrahlschneiden

Das Abtragen oder Schneiden mit Laserstrahlung - kurz Laserstrahlschneiden - wird nach den Klassifizierungen „Physik des Schneidvorgangs“ und „Art des von außen auf das Werkstück einwirkenden Energieträgers“ in DIN 2310 [43] und EN ISO 9013:2002 [42] den thermischen Trennverfahren zugeordnet. Als Schneidprozess, bei welchem jegliche Form eines mechanischen Kontakts zwischen Werkstück und Werkzeug fehlt, unterscheidet sich das thermische Schneiden mit Laserstrahlung im wesentlichen durch die Art der Energiezufuhr von anderen thermischen Abtragetechniken (z.B. erosive Verfahren).[12,28] Ein mit Hilfe einer Fokussieroptik gebündelter und auf das zu bearbeitende Werkstück gelenkter Laserstrahl liefert die zum Schneiden notwendige Energie. Im Bereich des Fokus des auftreffenden Laserstrahls entstehen lokal die zum Abtragen erforderlichen Intensitäten und damit sehr hohe Temperaturen auch bei geringer Laserausgangsleistung. Durch das sich im Werkstoff vollziehende Umsetzen der eingekoppelten Strahlleistung in Wärme und der damit verbundenen Materialaufheizung kommt es zur Begünstigung von Phasenumwandlungen. Deren Folge sind beispielsweise das lokale Aufschmelzen und das teilweise oder vollständige Verdamp-

fen des Werkstoffs. Das abgetragene Material entweicht als Dampf (Plasma) mit hoher kinetischer Energie aus der Wechselwirkungszone oder es wird in Form von Schmelze mit Unterstützung eines zusätzlichen zum Laserstrahl in der Regel koaxial einströmenden Gasstrahls ausgetrieben. Die Schnittfuge entsteht infolge des Vorschubs, welcher aus der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück resultiert.[3,10,11,12,14,26]

In der Praxis liegen alle angewandten Technologien als Mischformen vor. Eine Unterscheidung erfolgt beim Laserschneiden anhand der vorherrschenden Phase zwischen Brennschneiden, Schmelzschneiden und Sublimier- bzw. Sublimationsschneiden.[42,43] Als maßgebliche Aspekte für die Zuordnung der Verfahren sind zu nennen:

- das verwendete Schneidgas (oxidierend oder inert),
- der ablaufende Vorgang (Aufheizen/Brennen, Verflüssigen, Verdampfen),
- die mindestens zu erreichende Prozesstemperatur (Zündtemperatur, Schmelztemperatur, Verdampfungstemperatur) sowie
- der Zustand des abgetragenen Werkstoffes (Oxidationsprodukt, Flüssigkeit, Dampf).

Grundsätzlich bedürfen die benannten Schneidprozesse in unterschiedlichem Maße der Energiebereitstellung und führen im Ergebnis zu unterschiedlichen maximalen Schneidgeschwindigkeiten.[10,11] Bei der Auswahl des Schneidverfahrens ist zu entscheiden, ob mit kontinuierlichem oder gepulstem Strahl vorteilhaftere Ergebnisse erzielt werden können.[43]

1.3.3 Wechselwirkung Laserstrahl – Silizium

Ziel, vor allem bei der Bearbeitung spröder Materialien wie Silizium, ist häufig ein sogenannter „kalter“ Materialabtrag. Dieser zeichnet sich durch sehr hohe Laserstrahlintensitäten und möglichst kurze Einwirkzeiten aus. Es wird angestrebt, die Wärmeeinbringung in das Grundmaterial und die damit verbundene schmelzflüssige Phase auf ein Minimum zu reduzieren.[3,12,21,28] Daraus ergeben sich folgende Vorteile:

- die Wärmeleitungsverluste werden nahezu vermieden,
- die Wärmebelastung des zu bearbeitenden Werkstücks wird gleichzeitig gering gehalten,
- der größte Energieanteil wird zum Aufbrechen von Bindungen im Material genutzt.

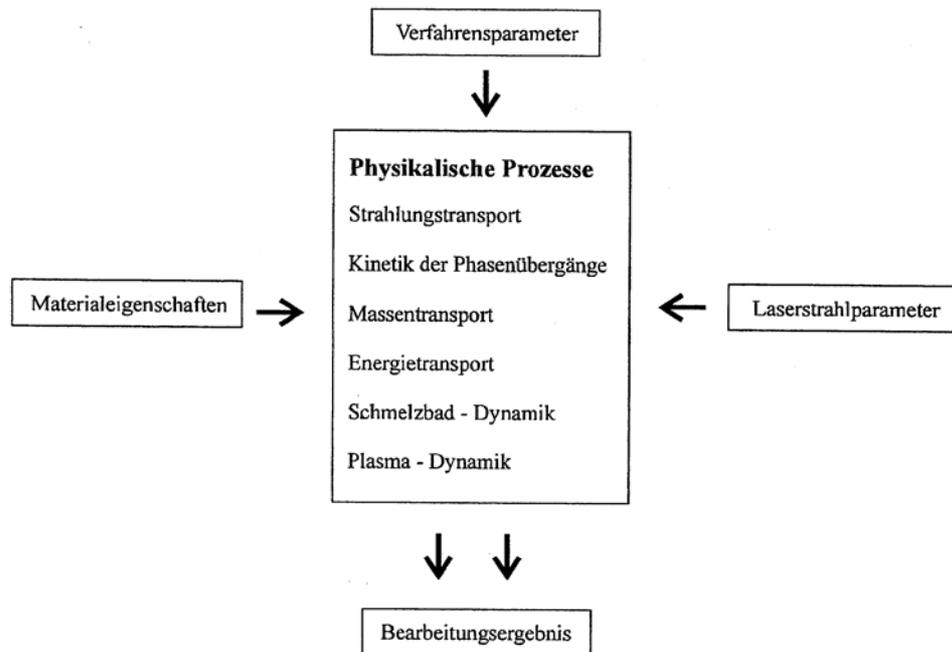


Abbildung 1.4: Physikalische Prozess-/ Verfahrensparameter bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung [2]

Solche Anforderungen können durch den Einsatz gepulster Laser erfüllt werden.

Das Schneiden mit Kurzpulslasern kann laut bestehender Normung (DIN 2310, EN ISO 9013:2002) dem Verfahren des Sublimierschneidens zugeordnet werden, „... bei dem die Schnittfuge dadurch entsteht, dass der Werkstoff dort überwiegend verdampft wird und die entstehenden Produkte durch Expansion oder von einem Gasstrahl hoher Geschwindigkeit aus der Schnittfuge ausgeblasen werden.“[42] Das Fugenmaterial wird also größtenteils unmittelbar von der festen in die gasförmige Phase überführt.[12] Davon ist auch die Wechselwirkung zwischen Laser und Materie geprägt (*Abbildung 1.4*).

Beim Sublimationsabtrag laufen folgende physikalischen Prozesse während des Bearbeitungsvorgangs ab (*Abbildung 1.5*) [4]:

- die Energieeinkopplung ins Werkstück durch Absorption,
- der Energietransport durch Wärmeleitung,
- die Energieumsetzung durch Phasenumwandlungen in der Wechselwirkungszone wie Aufheizen, Schmelzen, Verdampfen, gegebenenfalls Ionisieren (Plasmabildung),
- evtl. die Entstehung von Schockwellen [2] sowie
- der Massentransport durch den Materialaustrieb und die Ablagerung der Partikel in Form von Debris.

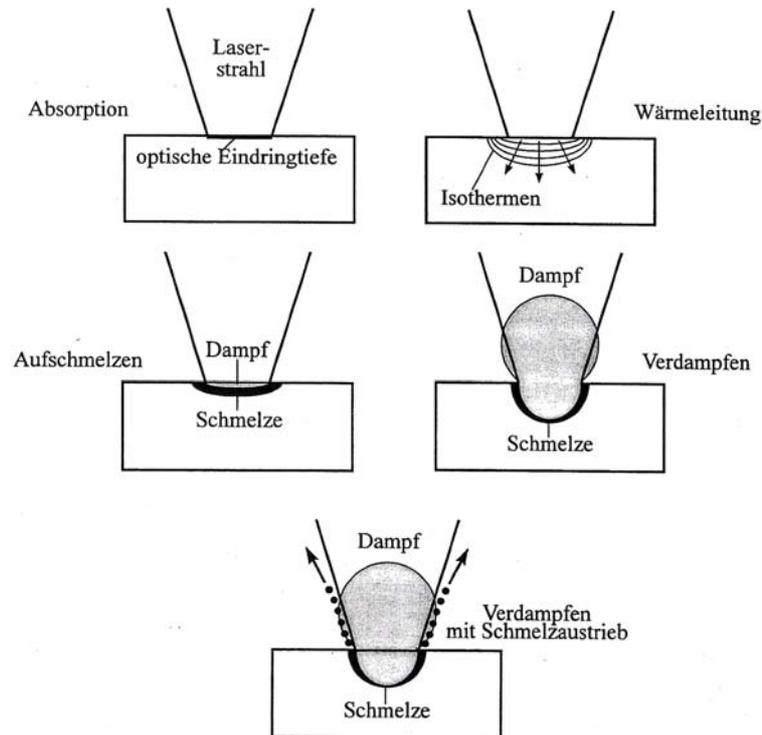


Abbildung 1.5: Verschiedene Phasen des Sublimationsabtrags mit Laserstrahlung [2]

Der Anteil des vom Werkstoff absorbierten Laserlichts ist durch den Absorptionsgrad, d.h. dem Verhältnis von absorbierter zu eingestrahelter Laserleistung, festgelegt.[28]

Bei Halbleitern erfolgt die Energieaufnahme in einer dünnen Schicht begrenzt durch die optische Eindringtiefe (Absorptionslänge) l_a an der Materialoberfläche.[2]

$$l_a = \frac{1}{\alpha} \quad (1)$$

Mit der Gleichung für den Absorptionskoeffizienten α

$$\alpha = \frac{4\pi n \kappa}{\lambda} \quad (2)$$

ergibt sich unter Einsetzen der optischen Brechzahl n , der spezifischen Beweglichkeit der freien Ladungsträger κ und der Wellenlänge λ die Dicke der absorbierenden Schicht.[14]

Dabei werden die Ladungsträger (Elektronen) im Strahlungsfeld der eindringenden Welle folgendermaßen angeregt: Bei Wechselwirkung zwischen den Elektronen des Festkörpers mit den Photonen der Laserstrahlung kommt es zu sogenannten Band-Band-Übergängen, wenn Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband (*Abbildung 1.6*) per Energiezu-

fuhr angehoben werden. Dadurch werden Elektronen-Loch-Paare induziert, welche nun ihre Energie durch Stöße auf das Gitter übertragen können.[2,14] Voraussetzung für die Überwindung der Bandlücke durch die Elektronen ist eine ausreichende Photonenenergie der einfallenden Lichtwelle der Wellenlänge λ

$$W_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad , \quad (3)$$

welche größer sein muss als die Energie des Bandabstandes W_g von 1,12 eV (Schwellenbedingung), damit der Vorgang stattfindet.[8] Der Energietransport aus dem Absorptionsvolumen in das Grundmaterial erfolgt über Wärmeleitung.[28]

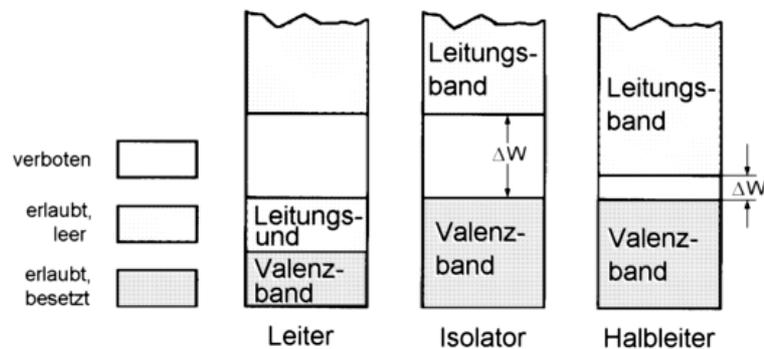


Abbildung 1.6: Bändermodell eines Halbleiters im Vergleich zum Metall und Isolator; vollständig gefülltes Valenzband und leeres Leitungsband, Trennung beider Bänder durch Bandlücke [47]

Übersteigt der Anteil an absorbierte Leistung die infolge Wärmeleitung eingetretenen Verluste, führt die Materialerwärmung zu Phasenumwandlungen im Werkstück.[28] Die dadurch hervorgerufenen Veränderungen müssen nicht zwangsläufig mit einer Aggregatzustandsänderung des Materials einhergehen. Ein Aufheizen der Materialoberfläche bedingt die Ausbildung eines Temperaturfeldes im verbleibenden Bauteil. Große Temperaturgradienten führen zu thermischen Spannungen, die nach der Abkühlphase häufig als Restspannungen im Bauteil verbleiben.

Mechanische Spannungen können durch plastische Verformungen (für $T > 600 \text{ °C}$) in der Aufheizphase z.B. durch lokale Wärmeausdehnung des Festkörpers erzeugt werden. Die versetzungsarmen Halbleitereinkristalle erfahren im Randbereich der Lasereinwirkstelle aufgrund einer starken Defektzunahme einen sprunghaften Anstieg der Versetzungsdichte. Weiterhin ist eine Entstehung starker lokaler Ionisationen als Folge hoher Anregungsdichten möglich. All diese Faktoren tragen zu einer thermisch induzierten Modifikation des Siliziumgitters bei. Der gesamte Bereich der Strukturveränderungen wird unter der Bezeichnung Wärmeeinflusszone (WEZ) zusammengefasst.[2]

Erreicht die Materialoberfläche Schmelztemperatur, kommt es zur Entstehung einer Schmelzschicht auf der bestrahlten Fläche, deren Ausdehnung von der Einwirkdauer der Laserstrahlung abhängt. Von der Schmelzbadoberfläche bis zur Grenzfläche Schmelze-Feststoff besteht ein Temperaturabfall von Verdampfungs- auf Schmelztemperatur.[28]

Sobald die Verdampfungstemperatur überschritten wird, setzt die Verdampfung des Werkstoffs an der Materialoberfläche ein. Geschieht dies innerhalb sehr kurzer Einwirkzeiten mit hohen Intensitäten, findet ein zunehmend direkter Phasenübergang von fest zu gasförmig statt.[28] Der entstandene Materialdampf expandiert gegen das Atmosphären gas und bewirkt einen Druck auf die Materialschmelze. Ist der Dampfdruck des mit hoher Geschwindigkeit aus der Schnittfuge abströmenden Materials (Erosionsjet) größer als die Oberflächenkräfte in der Schmelze, so erfolgt der Schmelzaustrieb ohne zusätzlichen Gasstrom.[2]

Einen meist unerwünschten Nebeneffekt stellt dabei die Formierung eines sogenannten laserinduzierten Plasmas dar. Dieses entsteht vorrangig bei Bestrahlung mit hohen Laserintensitäten. Im Falle großer Verdampfungsraten bildet sich eine oberflächennahe Materialdampfschicht, welche sich aufgrund zu geringer Expansionsgeschwindigkeit verdichtet. In der ausgetriebenen gasförmigen Teilchenwolke ist in Abhängigkeit von der Temperatur eine gewisse Anzahl freier Elektronen im Materialdampf enthalten. Diese reduzieren die Laserstrahlenergie indem sie durch sogenannte inverse Bremsstrahlung in dessen elektromagnetischem Strahlungsfeld beschleunigt werden. Mit Geschwindigkeitszunahme der Elektronen heizt sich der Materialdampf auf. Erreicht die Elektronenenergie schließlich Ionisierungspotenzial, führen die Stöße der schnellen Elektronen mit den Atomen im Materialdampf zur lawinenartigen Erzeugung weiterer freier Ladungsträger (Elektronen). Folge dieser starken Elektronenvermehrung ist die Ausbildung eines Materialdampfplasmas mit hoher Elektrodichte.[2,10,14]

Die Wirkung des Plasmas als Energiewandler im Austausch zwischen Laserstrahl, umgebender Atmosphäre und Werkstück [10,14] kann dabei stark ambivalent ausfallen. So ruft ein nichtstationäres, von der Oberfläche abströmendes Plasma Abschirmungseffekte hervor. Durch effektives Absorbieren sowie stärkere Streuung im dichteren Materialdampf nachfolgender Laserstrahlung, kommt es zu einer Abnahme der Intensität in der Bearbeitungszone. Dies bewirkt eine Verringerung des Materialabtrags. Es kann unter Umständen zum Zusammenbruch des Bearbeitungsprozesses führen.[19,26]

Die Betrachtung der Energieumformung der Laserstrahlung in Wärmeenergie offenbart darüber hinaus folgenden Aspekt: Ein stationäres, oberflächennahes Plasma kann als Flächenwärmequelle auf die Werkstückoberfläche einwirken.[10] Vorteile einer solchen Konstellation sind in der Absorptionserhöhung durch Reflexionssenkung bei hochreflektierenden Werkstoffen und der Temperaturerhöhung der Oberfläche infolge indirekter Aufheizung durch Wär-

mekontakt zu sehen. Diese haben eine maximale Verdampfungsrate bzw. Abtragsgeschwindigkeit sowie eine minimale Schmelztiefe aufgrund des starken ggf. sprunghaften Anstiegs der Leistungsaufnahme zur Folge. Es ergeben sich aber auch Nachteile hinsichtlich der Bearbeitungsqualität. Ursache dafür ist die Tatsache, dass sich die Veränderungen über die durch den Durchmesser des Laserstrahls definierte Bearbeitungszone hinaus erstrecken, da die wirksame Plasmaausdehnung nicht auf die Geometrie der Bearbeitungszone beschränkt werden kann. Die Folgen sind eine zum Teil erhebliche Kantenschärfeverminderung und eine angegriffene Oberfläche in der Umgebung der Bearbeitungsstelle.[2] Deshalb, sowie wegen der schwierig zu gestaltenden Steuerung der Prozesse im Plasma, wird versucht die Plasmabildung generell zu vermeiden.

Neben dem Plasma wirken feinste ausgeworfene Schmelzen-Partikel sowie Ausspritzer (UFP, ultra feine Partikel) durch Streuung strahlungsschwächend. Diese bilden sich häufig in der Gas- bzw. Plasmaphase durch Abkühlung und Kondensation. Als Debris schlagen sich diese Substanzen ggf. unter Reaktion mit den vorhandenen Prozessgasen um die Abtragszone auf dem Werkstück nieder und bilden so Ablagerungen.[19,27,28]

1.3.4 Allgemeiner Parameterzusammenhang

Schneidvorgänge sowie die daraus resultierenden Bearbeitungsergebnisse werden durch Parameter und Einflussfaktoren determiniert, welche vor allem in deren komplexem Zusammenwirken zu sehen sind.[14,28] Bei deren Analyse kristallisiert sich heraus, dass gemessen an ihrer Wirkung bei der Bearbeitung eines vorgegebenen Materials zwei maßgebliche Prozessgrößen besonders zu betrachten sind [12]:

1. die Laserintensität
2. die Einwirkdauer.

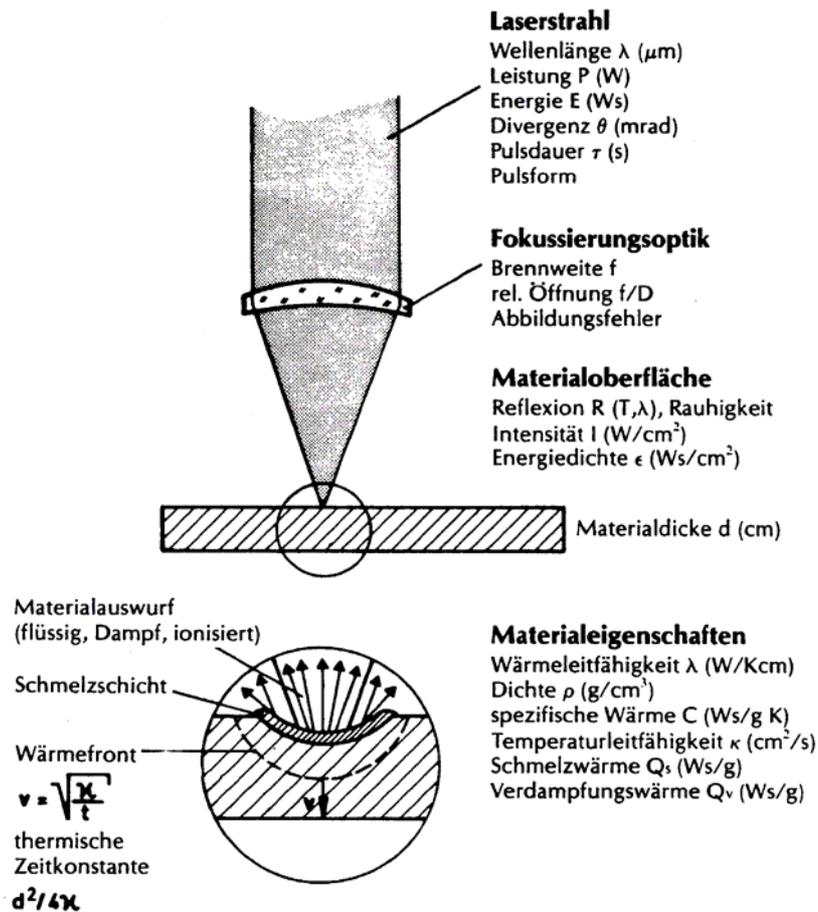


Abbildung 1.7: Schematische Anordnung zur Materialbearbeitung mittels Laser [4]

Die im Zuge der Anwendung des Laserstrahlschneidens erworbenen Erkenntnisse implizieren folgende grundsätzlichen Zusammenhänge:

Der Ergebnisparameterbereich in Bezug auf die schneidbare Werkstückdicke sowie die maximale Abtragraten bzw. Schneidgeschwindigkeit ist durch die Absorption, die Fokussierbarkeit (Strahlqualität, minimal erreichbarer Strahldurchmesser) und die Kenngrößen der Laserstrahlung (mittlere Ausgangsleistung/Pulsleistung) gegeben (Abbildung 1.7). [3,4,14,26,28]

Dabei hängt der Absorptionsgrad des Werkstoffs von den Laserstrahleigenschaften wie Wellenlänge und Polarisationszustand des zur Bearbeitung verwendeten Laserlichts, den jeweiligen Werkstoffeigenschaften sowie den Umgebungsbedingungen ab. Werkstoffe werden z.B. durch Oberflächeneigenschaften (Rauheit, Geometrie, Verschmutzung, Deckschichten) und Materialtemperatur charakterisiert; Relevante Umgebungsbedingungen sind u.a. Prozessgase und laserinduziertes Plasma.[14,28] Für alle schneidbaren Werkstoffe gilt: es existiert eine minimale Pulsintensität (Grenzintensität), die innerhalb der Lasereinwirkdauer zum Erzielen eines Schnittes erforderlich ist. In Zusammenhang mit der Absorption ist diese abhängig von den thermischen Materialkonstanten (Materialart, Materialdicke) und der Größe der Schneidfront (Strahldurchmesser, Schneidtiefe).[28]

Bestmögliche Fokussierbarkeit für einen Laserstrahl liegt vor, wenn er im Grundmode (TEM₀₀-Mode) schwingt und seine Intensitätsverteilung einer Gauß'schen Kurve folgt.[3] Über entsprechende Gestaltung der Brennweite der Fokussieroptik ist es möglich, kleinste Strahldurchmesser zu erzielen.[26] Des Weiteren ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Laserstrahl von Belang.

Zu den werkstoffspezifischen Größen, die für die lasergestützte Bearbeitung relevant sind, zählen der spektrale Absorptionskoeffizient, die Materialdichte, die spezifische Wärme- bzw. Temperaturleitfähigkeit und die spezifischen Schmelz- und Verdampfungstemperaturen.[19,28] Allgemein gilt: je höher der Absorptionsgrad und je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Materials, umso höher ist die Laserenergie, welche als Prozessenergie in der Bearbeitungszone zur Verfügung steht.[28]

Maßgebend für die Schnittfugenbreite ist neben der Fokussierung (Fokusbereich, Fokusbereich, Fokusbereich) [3,14] die Pulsleistung, die Symmetrie der Intensitätsverteilung und die Schneidrichtung. Es gilt: Je kleiner der Fokusbereich, desto schmaler fällt die Schnittfuge aus. Bei niedrigen Pulsleistungen entspricht die Fugenbreite annähernd dem Fokusbereich und nimmt mit steigender Pulsleistung zu. In Abhängigkeit von der Schneidrichtung können unterschiedliche Schnittfugenbreiten entstehen. Mögliche Ursachen sind u.a. eine wechselnde Polarisationsrichtung, anisotrope kristallographische Eigenschaften des Materials sowie eine asymmetrische (nicht radialsymmetrische) Intensitätsverteilung des Laserstrahls.[28]

Die Form der Schnittfuge (Konizität/Parallelität der Schnittflächen) wird von den geometrischen Strahlengrößen (Strahlparameterprodukt: Fokusbereich, Fokusbereich, Fokusbereich) in Abhängigkeit von Aufweitungsfaktor und Brennweite sowie Lage der Fokusebene relativ zur Werkstückoberfläche bestimmt. Jedoch ist auch eine an Werkstoff, Schneiddicke und Fokusbereich angepasste Pulsleistung und -energie für die Fugengeometrie von Bedeutung. Entsprechend gilt, dass mit sehr geringer Rayleighlänge parallele Schnittflächen selten sind, während bei kleinen Materialdicken mit hoher Wahrscheinlichkeit parallele Schnittflächen gewährleistet werden. Somit nimmt die Neigung zur Parallelität von Schnittflächen mit ansteigender Rayleighlänge zu. Als Ursache ist die größere Wirkungstiefe der Linien gleicher Leistungsdichte (Isophoten) anzusehen.[28]

Neben der Festlegung des Schneidverfahrens und der damit verbundenen Auswirkung auf den Schmelzaustrieb beeinflussen Gasart und Gasströmung in hohem Maß die Schnittflächenqualität im Schnittspalt.[28] Von Bedeutung für eine gute Reproduzierbarkeit ist die langzeitlich hohe Leistungskonstanz. Sie ist ein wichtiger Faktor für die Prozessqualität.[3]

Aus den vorangegangenen Betrachtungen kann für das Trennen von Silizium geschlussfolgert werden: Um einen effektiven und schnellen Abtrag mit hohen Intensitäten bei geringer Materialeinbuße durch schmale Schnittfugen zu erhalten, ist ein kleiner Fokusbereich (= kleinste Strukturgröße) erstrebenswert. Dazu im Widerspruch steht allerdings das Erfordernis einer großen Schärfentiefe durch einen langgestreckten Fokus, um auch dickere Materialien qualitativ gut schneiden zu können, parallele Schnittflächen zu realisieren und die Auswirkungen möglicher geringfügiger Dejustierung (Abstandsänderungen Optik - Werkstück) zu minimieren.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Versuchstechnische Voraussetzungen

2.1.1 Versuchsaufbau (Lasermikrobearbeitungsanlage)

Die zur Feinbearbeitung eingesetzte Laseranlage besteht aus drei Komponenten. Dazu gehören die Strahlquelle, die Fokussieroptik sowie die Stromversorgung, das Kühlsystem und die Steuerung (*Abbildung 2.1*).



Abbildung 2.1: Lasermikrobearbeitungsanlage

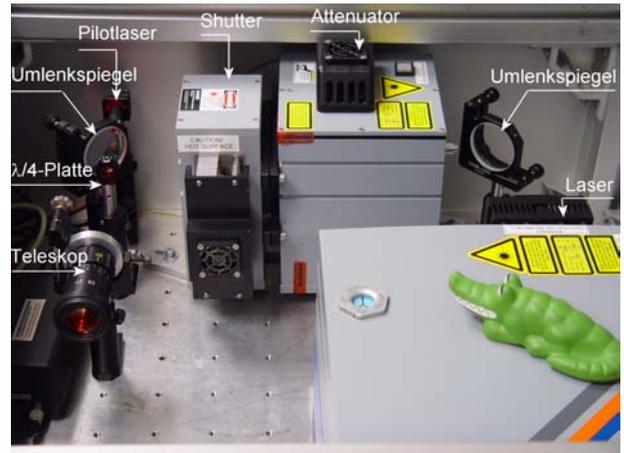


Abbildung 2.2: Strahlführung

Die Strahlquelle (*Abbildung 2.2*) ist ein diodengepumpter Nd:YAG-Festkörperlaser vom Typ GATOR UV der Firma Lambda Physik AG (Leistungsvarianten 3 W und 10 W). Dieser arbeitet mittels optischer Güteschaltung (Q-switch) im Pulsbetrieb. Durch die Abgabe der im Laserkristall gespeicherten Energie in kurzen Pulsen (Pulsdauer: 15 ns) mit hohen Pulsenergien (Pulsenergien: 0,3 mJ bei 3 W; 1 mJ bei 10 W) bzw. Pulsspitzenleistungen und einer Pulswiederholrate (Repetitionsrate) von 10 kHz bei hoher Resonatorgüte [14,26,28] sollen thermische Effekte wie Schmelzeablagerungen und Wärmeeinflusszonen an den Schnittkanten reduziert werden.[17]

Der frequenzverdreifachte UV-Laser besitzt eine Wellenlänge von 355 nm. Die Photonenenergie der Strahlung beträgt somit 3,49 eV.

Frequenzvervielfachung wird durch nichtlineare optische Kristalle (z.B. KDP) unter Erzeugung höherer Harmonischer oder Oberwellen [4,19] zur Grundwellenlänge von 1,0648 μm [7,19,26] realisiert.

Für den Nd:YAG-Laser ergeben sich die Grundwellenlänge im nahen infraroten Spektralbereich, die kürzeren Wellenlängen im Grün-Bereich (532 nm) und im UV-Bereich (355 nm; 266 nm). In *Tabelle 2.1* sind die wichtigsten Laserparameter zusammengestellt.

Tabelle 2.1: wichtige Laser-Spezifikationen/Daten [Quelle: Datenblätter des Herstellers]

Lasertyp	GATOR UV	POWERGATOR UV
Emissionswellenlänge [nm]	355	355
Laserausgangsleistung (bei 10 kHz) [W]	3	> 10
Pulswiederholrate [kHz]	10	7,5 – 15 (variierbar)
Pulsenergie (bei 10 kHz) [mJ]	0,3	> 1
Pulslänge/ Pulsdauer [ns]	15	15
Rohstrahldurchmesser [mm]	1	1
Polarisationsverhältnis: linear	> 25 : 1	> 25 : 1
Polarisationsrichtung	Horizontal	Horizontal
Strahlqualität	TEM ₀₀	TEM ₀₀

Die Verteilung der Intensität des emittierten Laserstrahls im transversalen Grundmode (TEM_{00}) entspricht einer Gauß-Verteilung. Der Strahl liegt in linear polarisierter Form mit horizontaler Schwingungsrichtung vor.

Zur Strahlführung und -formung kommen sowohl transmittierende (Linsen, Objektive) als auch reflektierende (Spiegel) optische Komponenten zum Einsatz.[3]

Der Strahldurchmesser wird zunächst mit Hilfe eines Teleskops mit 5facher Vergrößerung aufgeweitet. Dies geschieht zur Verringerung der auf die optischen Komponenten einwirkenden Strahlintensität sowie zum Erreichen kleinerer Fokusdurchmesser.[3,26]

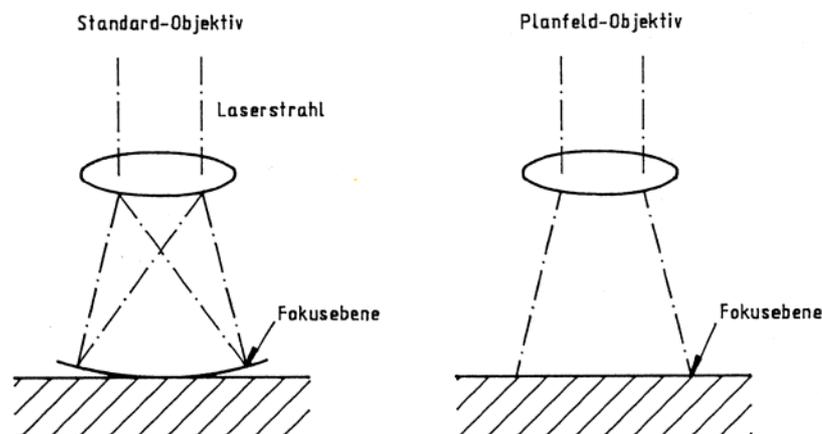


Abbildung 2.3: Vergleich Planfeldobjektiv und Standardobjektiv [19]

Anschließend wird der Strahl mit einem Objektiv langer Brennweite und dementsprechend großem Arbeitsabstand gebündelt. Als Fokussierobjektiv wird in Verbindung mit der Scannerablenkeinheit ein Planfeldobjektiv – F-Theta-Optik – verwendet. Ihr mehrstufiger Aufbau im Linsensystem dient zur Gewährleistung nahezu konstanter Verhältnisse im Fokusbereich. Dabei liegt der Fokuspunkt des Laserstrahles an jedem Punkt im Arbeitsfeld in der durch den Fokusabstand festgelegten Ebene (*Abbildung 2.3*).[19]

Ein solches Objektiv wird durch die Angaben zu Brennweite, Arbeitsabstand, maximaler Bearbeitungsfeldgröße und minimalem Fokusdurchmesser ausreichend spezifiziert (*Tabelle 2.2*).

Tabelle 2.2: wichtige Daten zur Fokussierung

Parameter	Wert
Aufweitung	5fach (Teleskop)
Fokussierobjektiv	F-Theta-Optik
Arbeitsfeldgröße [mm]	50 x 50
Brennweite [mm]	100
Theoretischer Fokusdurchmesser [μm]	9
Praktischer Fokusdurchmesser [μm]	23
Theoretische Rayleighlänge [mm]	0,18
Praktische Rayleighlänge [mm]	0,30

Der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls im TEM₀₀-Mode ist definiert als die Strahlquerschnittsfläche, in der 86 % der Gesamtstrahlleistung enthalten sind [3], und ergibt sich unmittelbar aus dem Strahlparameterprodukt (Produkt aus Tailenradius und halbem Divergenzwinkel):

$$r_0 \frac{\Theta}{2} = \frac{d_0 \Theta}{4} = \frac{d_f \Theta_L}{4} = \frac{\lambda}{\pi} = \text{const.} \quad (4)$$

$$\text{mit} \quad \Theta_L = \frac{d_L}{f} \quad \text{und} \quad F = \frac{f}{d_L} = \frac{1}{\Theta_L} \quad (5), (6)$$

$$\text{zu} \quad d_f = \frac{4\lambda F}{\pi} = \frac{4\lambda f}{\pi d_L} \quad (7)$$

wobei d_L den Laserstrahldurchmesser am Ort der Fokussieroptik, f die Brennweite der Fokussieroptik und F die Fokussierzahl des Strahls der Wellenlänge λ darstellen.[3] Mit einem Rohstrahldurchmesser von ca. 1 mm errechnet sich der theoretische Fokusbereich (beugungsbegrenzt) nach 5facher Strahlaufweitung zu ca. 9 μm .

Der praktische Fokusbereich, der zudem von weiteren die Strahlqualität betreffenden Effekten (höhere Modenordnung, Beugung aufgrund von Linsenfehlern wie sphärische Aberration, Aperturen, endlicher Strahldurchmesser sowie Phasenfehler im Resonator) bestimmt wird [3], ist einer Vermessung zur Strahlanalyse entnommen worden (*Abbildung 2.4*).

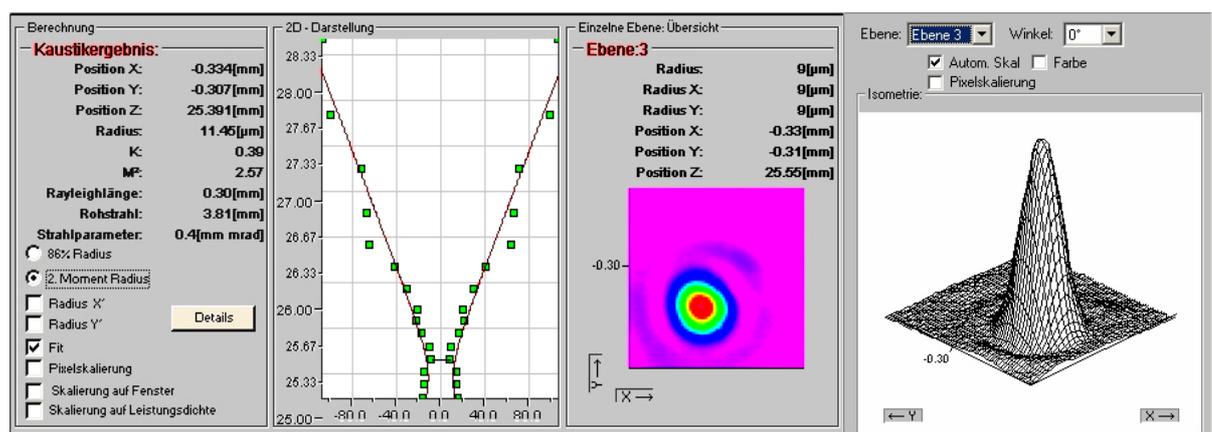


Abbildung 2.4: Strahlanalyse

Mit Kenntnis des Fokusdurchmessers kann die Laserintensität am Ort der Bearbeitung mit Hilfe des Zusammenhangs zwischen Intensitätsmaximum I_0 im Zentrum des Fokus und Laserleistung P_L [14]:

$$P_L = \int_0^{\infty} I(r) 2\pi r dr = \frac{I_0}{2} r_F^2 \pi \quad \text{und somit} \quad I_0 = \frac{2P_L}{r_F^2 \pi} \quad (8), (9)$$

zu 0,0014 und 0,0048 GW/cm² für 3 W bzw. 10 W Laserausgangsleistung berechnet werden.

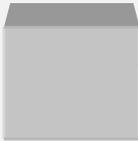
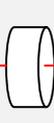
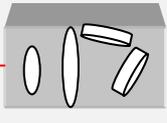
Als Schärfentiefe wird die doppelte Rayleighlänge verwendet. Sie ist definiert als der Abstand von der Strahltaile, nachdem sich die Strahlintensität (Maximalintensität) halbiert bzw. der Strahlradius um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert d.h., die Querschnittsfläche des Strahls verdoppelt hat [10]:

$$z_R = \frac{\pi d_0^2}{4\lambda} = \frac{4\lambda}{\pi} F^2 \quad (10)$$

Der berechnete Wert für die Rayleighlänge beträgt 0,18 mm. Nach jeder Justierung ist die Fokusebene neu zu bestimmen und auf die Probe einzustellen.

Weil der Laserstrahl nach Auskopplung aus dem Laserresonator auf seinem Weg zum Werkstück durch Beugungs- und Absorptionseffekte Verluste erfährt, ist eine Messung der Strahlleistung zur exakten Intensitätsbestimmung an der Bearbeitungsstelle d.h., am Werkstück erforderlich. Diese ist mittels eines pyroelektrischen Leistungsmessgerätes ermittelt worden und prozentual in bezug auf die standardmäßig am Laser geräteintern gemessenen Leistung in *Tabelle 2.3* angegeben. Bei Verwendung des 10 W-Lasersystems wurde zusätzlich zu dem elektronischen Shutter ein Strahlabschwächer (Attenuator) in den Strahlengang eingebracht. Durch Variation der Transmission ist somit eine stufenweise Einstellung der Laserleistung möglich.

Tabelle 2.3: Prinzipdarstellung/Daten der optischen Leistungsübertragung

	Laser	US1	Attenuator, Shutter	US2	$\lambda/4$	Teleskop (1:5) Scanner
						
τ_x [%]	100	95	100	94	98	88

τ [%]	100	95	95	90	88	77
------------	-----	----	----	----	----	----

Für die Versuche unter reproduzierbaren Bedingungen in einer abgeschlossenen Gasatmosphäre und im Vakuum stand eine evakuierbare Probenkammer mit Quarzglasfenster sowie



Abbildung 2.5: Vakuummkammer mit Druckmessgerät



Abbildung 2.6: Probenkammer mit Probe

eine Vorvakuumpumpe mit Piranivakuummeter zur Drucküberwachung zur Verfügung (Abbildungen 2.5 und 2.6).

2.1.2 Strahlführung (Scanner, Festoptik)

Vorteile der Laserstrahltechnik sind die hohe Genauigkeit (liegt zwischen der des Ätzens und der des mechanischen Schneidens) sowie die hohe Flexibilität.[17] Auf deren Kombination basieren Bewegungs- und Handhabungssysteme von Laserstrahl und Werkstück. Bestehende Anlagenkonzepte unterscheiden sich im Zusammenspiel von Laserstrahlführung, Maschinenkinematik und Steuerung in der Art und Weise der Erzeugung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und zu bearbeitendem Material.[3] Bei der vorliegenden Anlage existieren zwei unterschiedliche Möglichkeiten (Antriebskonzeptvarianten) für die Laserbearbeitung [4,19]:

Für niedrigere Arbeitsgeschwindigkeiten kann das Werkstück auf einem x-y-Verschietisch bei feststehender Laserbearbeitungsoptik über Vorschubantriebe der einzelnen Linearachsen relativ zum Laserstrahl verschoben werden. Der maximale Verfahrensweg des in diesem System verwendeten 3-achsigen Positioniertischs 1000 DC der Firma Aerotech beträgt 150 mm in jede der drei Raumrichtungen (Positioniergenauigkeit: 5 μm). Es können Geschwindigkeiten bis maximal 1000 mm/min eingestellt werden.

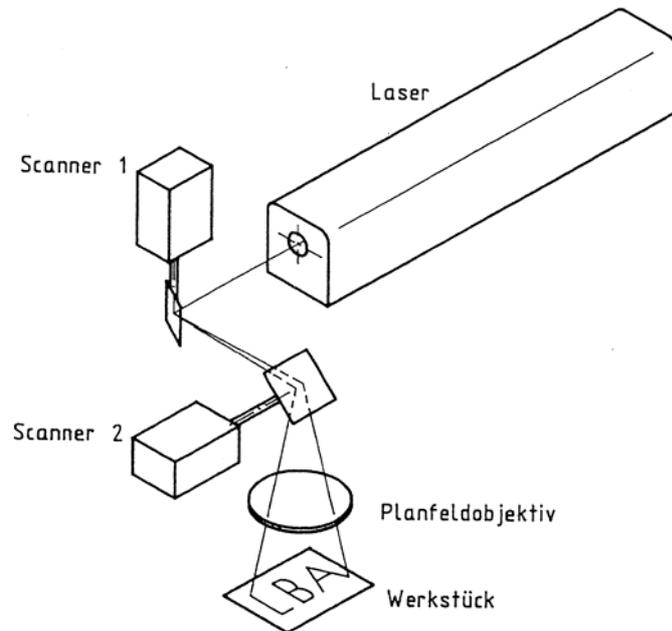


Abbildung 2.7: Grundprinzip einer Strahlableitungseinheit zur Vektorablenkung [19]

Im umgekehrten Fall wird der Laserstrahl über eine bewegte Laserbearbeitungsoptik bei feststehendem Lasersystem und stationärem Werkstück abgelenkt. Aufgrund sehr geringer zu bewegnender Massen durch fast trägheitsloses Positionieren des Laserstrahls können sehr hohe Arbeitsgeschwindigkeiten - 6000 mm/s bei dem verwendeten System - erreicht werden. Über zwei Laserspiegel auf elektromechanischen Antrieben wird der Laserstrahl mittels Steuerspannungen ausgelenkt (*Abbildung 2.7*) und führt so zu einem schnellen Abtasten (Scannen) der Probe.

Bei dem für diese Untersuchungen verwendeten System handelt es sich um einen Scanner der Firma Arges mit einem Arbeitsfeld von 50 mm x 50 mm und einer Strahlführungsgenauigkeit von ca. 1 % des Verfahrensweges (*Tabelle 2.4*).

Tabelle 2.4: Vergleich von Verfahren zur Erzeugung der Relativbewegung Laserstrahl – Werkstück

Form der Relativbewegung	Tischsteuerung	Scanner
Bewegungslänge [mm]	150	50
Maximale Geschwindigkeit [mm/s]	Ca. 17 (1000 mm/min)	6000
Minimale Geschwindigkeit [mm/s]	-	0,025
Positioniergenauigkeit [µm]	Ca. 5	Ca. 500 (entspricht ca. 1 %)
Programmierung	CNC/UNIDEX (u 500)	ARGES Inscript

Die Steuerung von Strahlableitung und Positioniertischen von Laseranlagen erfolgt mit Hilfe von rechnergestützten Systemen durch Programmierung (z.B. Erstellung von Werkstückgeometrien mit CAD-Systemen, NC-Programmierung für die Arbeitsplanung).[3]

Die Tischsteuerung wird über CNC-Programmierung implementiert. Kennzeichen solcher Steuerungen ist es, dass die notwendigen Arbeitsinformationen (Geometrie- und Technolo-

gieinformationen) in Form numerischer Steuerbefehle (NC-Sätze) eingegeben/editiert werden. Relevant sind Steuerungsinformationen, Weginformationen (Lagesollwerte, Führungsgrößen), Schaltinformationen (z.B. Shutter-, Laserleistungssteuerung) und Informationen zur Steuerungsart (Punkt-, Strecken- oder Bahnsteuerung). Die Bahnbewegung zum Ausschneiden der Gesamtkontur ergibt sich durch das Zusammensetzen der Bewegungen der Einzelachsen (der einzelnen NC-Sätze) durch vektorielle Addition.[3,11] Die Programmierung und Steuerung erfolgte unter Nutzung der Software Unidex, einem Produkt der Firma Aerotech.

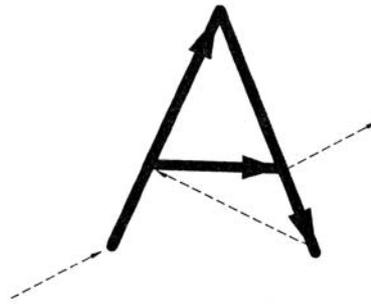


Abbildung 2.8: Schreibweise beim Vektorverfahren am Beispiel des Buchstaben "A" [19]

Die damit für die Untersuchungen erstellten Programme liegen als Quellcodes im *Anhang E* dieser Diplomarbeit vor.

Bei der Scannerprogrammierung werden drei Verfahren zur Strahlablenkung bzw. Bildgenerierung unterschieden: das Vektorverfahren, das Rasterverfahren und die Maskentechnik. Beim Laserstrahlschneiden wird das Vektorverfahren angewandt.

Dabei wird eine Linie mit konstanter Geschwindigkeit von Punkt A nach Punkt B gezeichnet; bei Sprüngen zwischen zwei Punkten wird der ebenfalls elektronisch angesteuerte Shutter geschlossen und mit definierter Ablenkgeschwindigkeit verfahren (*Abbildung 2.8*).[19]

2.2 Bewertungskriterien

Unter Variation verschiedenster Prozess- und Bearbeitungsparameter soll das Bearbeitungsergebnis nach dem in *Abbildung 2.9* dargestellten Schema in Hinblick auf die Schneidgeschwindigkeit und die Schnittqualität beurteilt werden.[28]

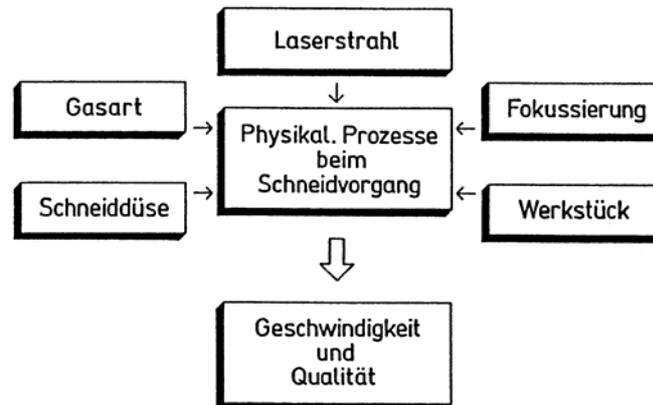


Abbildung 2.9: Einflussfaktoren beim Schneidvorgang [14]

2.2.1 Schneidgeschwindigkeit

Die Schneidgeschwindigkeit ist eine sehr wichtige Prozessgröße, da sie erheblich zur Wirtschaftlichkeit (Stückkostengestaltung) beiträgt. Abhängig von Material und Materialdicke ist sie deshalb in Zusammenhang mit den Werkstoffparametern zu sehen.[28]

Zur Ermittlung der tatsächlichen Prozessgeschwindigkeit wird an dieser Stelle die effektive Schneidgeschwindigkeit definiert. Sie bezieht sich auf die Länge der auszuschneidenden Sollkontur und die zu deren vollständigem Ausschneiden benötigten Zeit. Da ein einfaches Durchschneiden des vorliegenden Siliziums mit Materialdicken von ca. 210 µm und 300 µm in einem Zug in der Regel nicht möglich ist, muss dieselbe Schnittfuge mehrfach abgefahren werden. Diese Methode des Mehrfachscans wird häufig beim Laserstrahl-Schneiden mit Kurzpuls-Lasern angewandt. Infolge eines stufenweise Abtrags wird auf diese Weise eine Steigerung der Eindring- bzw. Abtragstiefe erreicht.[8] Da Scangeschwindigkeit und Prozessgeschwindigkeit durch die Prozesszeitverlängerung infolge einer erhöhten Anzahl von Scans nicht mehr übereinstimmen, errechnet sich die effektive Schneidgeschwindigkeit als Maß für die Prozessgeschwindigkeit in diesem Fall aus:

$$v_{eff} = \frac{S_{Kontur}}{t_{scan} n} = \frac{v_{scan}}{n} \quad (11)$$

mit v_{scan} für Relativgeschwindigkeit zwischen Laserstrahl und Werkstück (Vorschub) und n für Anzahl Überfahrten.

Als auszuschneidende Kontur für die Messung der Schneidgeschwindigkeit wurde ein Quadrat von 4 mm x 4 mm Kantenlänge gewählt, um bestimmte richtungsabhängige Einflüsse

vektoriell „auszumitteln“. Die in den Messwertetabellen ausgewiesene Fehlergröße (Messunsicherheit) zur Schneidgeschwindigkeit wurde nach Gleichung (D.4) im *Anhang D* errechnet.

2.2.2 Schnittqualität

Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der technischen Eignung eines Laserschnittes ist neben der erzielbaren Bearbeitungsgeschwindigkeit die Bearbeitungsqualität. Im Gegensatz zur Geschwindigkeit ist die Qualität jedoch keine objektiv mess- und bewertbare Größe. Hinzu kommt, dass die Qualitätsanforderungen in Abhängigkeit von der erforderlichen Genauigkeit, der zulässigen Beanspruchung und weiterer Bearbeitungsschritte sehr stark anwendungsspezifisch variieren. Daher sind in der Praxis bei Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an das Bauteil für den konkreten Anwendungsfall häufig Optimierungsmaßnahmen angezeigt.[2,11,14]

Kenngößen und Kriterien zur Charakterisierung und Bewertung der Schnittqualität speziell der Güte von Schnittflächen sowie der Schnittfugengeometrie sind in DIN 2310 „Thermisches Schneiden“, der VDI-Richtlinie 2906 und DIN 8518 „Fehler an Brennschnitten und Plasmaschnitten“ zusammengestellt.[3,28,42,43,44] Die dort nach den Gesichtspunkten Feingestaltabweichung, Grobgestaltabweichung und Werkstoffbeeinflussung bzw. Schnittflächengüte differenzierten Unregelmäßigkeiten bzw. Abweichungen von der vorgesehenen Schnittform und -lage beziehen sich jedoch vorrangig auf das thermische Schneiden von Metallen sowie auf Laserstrahlschnitte bei 0,5 bis 40 mm Materialdicke. Daher ist die bestehende Normung zur Beurteilung im Rahmen einer Lasermikrostrukturierung nur bedingt geeignet.

In Abhängigkeit von der unterschiedlichen Auswirkung des Wärmeeinflusses speziell bei der Bearbeitung von einkristallinen Halbleitermaterialien wie Silizium [27], existieren unterschiedliche Verfahren zur Untersuchung der Schnittqualität. Diesbezüglich wurden verschiedene direkte und indirekte Nachweismöglichkeiten des Einflusses im Materialinneren z.B. von thermisch angeregten Kristallfehlern bzw. Störungen des regelmäßigen Kristall-Aufbaus (Punktdefekte, Liniendefekte, Flächendefekte) [13,19] und an der Materialoberfläche (veränderte Oberflächentextur, Materialaufwurf, Materialaustrieb, Ablagerungsform) [2] erarbeitet, welche hier nicht alle aufgezählt werden sollen.

Lichtmikroskopische Untersuchungen geben Aufschluss über Ablagerungsausdehnung und -Beschaffenheit loser Partikel oder stark oxidiertes Schmelzaufwürfe. Ebenso besteht die Möglichkeit im REM einen topographischen Eindruck von der Materialoberfläche bzw. dem oberflächlichen Materialaufwurf zu erlangen. Zudem ergibt sich neben einer genauen Betrachtung der Morphologie der entstandenen Schichten mit hohen Vergrößerungen die Mög-

lichkeit einer qualitativen und quantitativen EDX-Analyse der chemischen Zusammensetzung von Ablagerungen.

Daraus sind folgende quantitativ messbare Beschreibungsgrößen (Kriterien der Schnittfugegeometrie) zur Beurteilung der Schnittqualität abgeleitet worden [3]:

- die Schnittfugenbreite w (am Strahleintritt und am Strahlaustritt),
- der Flanken- oder Wandwinkel α (Maß für die Konizität/Schnittflächenparallelität) und
- die Ausdehnung der Kernzone der Ablagerungen.

Diese werden in der Regel optisch mit Hilfe eines Lichtmikroskops mit 20facher Vergrößerung an zuvor unter gleichen Parametern wie bei der Ermittlung der effektiven Schneidgeschwindigkeit erzeugten Schnitten vermessen. Als Ausdehnung für die Hauptablagerungen wird die gesamte Spanne auf beiden Seiten der Schnittfuge angegeben.

Der Flankenwinkel (Wandwinkel) berechnet sich aus den Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und Strahlaustritt zu:

$$\alpha = \arctan \frac{(w_{SE} - w_{SA})}{2s} , \quad (12)$$

wobei w_{SE} die mittlere Schnittfugenbreite am Strahleintritt, w_{SA} die mittlere Schnittfugenbreite am Strahlaustritt und s die Materialdicke darstellen.

Bei der Untersuchung der Einflüsse von Prozessgasen auf das Bearbeitungsergebnis wurden die Ablagerungsschichten zusätzlich im REM auf Wiederanlagerung (Redeposite) abgetragenen Materials, die Anhaftung von Oxidresten und das Auftreten von Ausspritzern näher untersucht.

Das Bearbeitungsergebnis (Schneidgeschwindigkeit, Schnittqualität) wird wie unter Punkt 1.3.4 beschrieben durch mehrere verschiedene Bearbeitungsparameter bestimmt. [2,8,10,19,26,27] Diese können in der Regel nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Da eine Erfassung mehrerer verschiedener Einflüsse gleichzeitig in Form einer mehrdimensionalen Matrix nur schwer möglich ist, wird in den folgenden Untersuchungen durch das konstant Halten aller übrigen Prozessparameter versucht, diesen komplexen Zusammenhang auf ein eindimensionales Problem zurück zu führen bzw. zu beschränken.

Die untersuchten Einflussgrößen wurden unter den Aspekten Material- bzw. Werkstoffeigenschaften, Laserparameter und weitere Prozess- bzw. Verfahrensparameter strukturiert.

2.3 Einfluss von Werkstoffeigenschaften

2.3.1 Materialdicke

Von Relevanz für das Laserstrahltrennen von Silizium ist insbesondere die Kenntnis darüber, bei welcher Materialdicke sich ein Siliziumwafer besonders effizient und gut trennen lässt und ab welcher Dicke kein Durchtrennen mehr möglich ist. Dabei kann in Bezug auf die Erwartungshaltung auf bekannte Zusammenhänge bei der Bearbeitung anderer Materialien wie beispielsweise von Stahlblech im Bereich Maschinenbau zurückgegriffen werden.

Aufgrund zunehmender Materialdicke und damit zunehmender Schneidtiefe muss eine größere Menge Material abgetragen werden. Bei Werten über 500 µm wird bereits mit dem Erreichen der größten schneidbaren Materialdicke gerechnet. Diese ist durch das Material selbst, die Lasereinstellwerte wie Pulsleistung und Pulsdauer, Fokussierung (Rayleighlänge) und das Schachtverhältnis (Verhältnis von Schneiddicke zu Fugenbreite) gegeben. Aufgrund dessen, dass der Laserstrahl zunächst zum Fokus hin zusammen läuft und danach wieder auseinander (Strahlkaustik) variiert zudem der wirksame Strahldurchmesser Materialdicke. Die maximale Laserstrahlintensität I_0 im Fokuszentrum nimmt demnach bei konstanten Lasereinstellwerten und Fokusslage, nach Gleichung

$$I_0(z) = I_0(0) \frac{w_0^2}{w(z)^2} \quad (13)$$

mit steigendem Strahlradius w bei zunehmender Defokussierung z ($I \sim \frac{1}{r^2}$) ab.

Aufgrund dessen ist davon auszugehen, dass die erforderliche Lasereinwirkdauer d.h. die Anzahl an erforderlichen Schneidzyklen (Anzahl notwendiger Überfahrten) mit zunehmender Materialdicke überproportional ansteigt.[14,28]

Für die Schnittfugenbreiten w wird infolge einer stärkeren Strahlaufweitung bereits innerhalb des Werkstoffes mit zunehmender Materialdicke eine Vergrößerung der Schnittfugenbreite am Strahlaustritt erwartet, da die gegebenen Materialdicken die Rayleighlänge (300 µm) überschreiten. Im Falle einer Fugenverbreiterung am Strahlaustritt wird auch ein Einfluss auf den Wandwinkel und somit auf die Schnittkantengeometrie (Konizität) erwartet, während mit einer näherungsweise unveränderten Schnittfugenbreite am Strahleintritt gerechnet wird.[28]

Wie unter 2.2 erläutert, wurde das Bearbeitungsergebnis in Abhängigkeit von der Materialdicke ermittelt. Es standen Siliziumwafer in drei gängigen Dickenabstufungen ca. 220 µm, ca.

330 μm und ca. 530 μm zur Verfügung. Dabei wurden weitere variierbare Prozessparameter wie die Laserleistung ($P = 3 \text{ W}$), die Pulswiederholrate ($f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$), die Polarisationsrichtung (zirkular polarisiert) und die Fokusslage ($\pm 0 \text{ mm}$; Werkstückoberfläche) konstant gehalten. Der Schneidvorgang erfolgte mit einer Scangeschwindigkeit v_{scan} von 50 mm/s an Luft. Weitere Werkstoffparameter, sind die Kristallorientierung ($\langle 111 \rangle$ -Wafer) und die Oberflächenbeschaffenheit der Wafer (poliert). *Anhang A.1* enthält die dabei gemessenen und berechneten Werte.

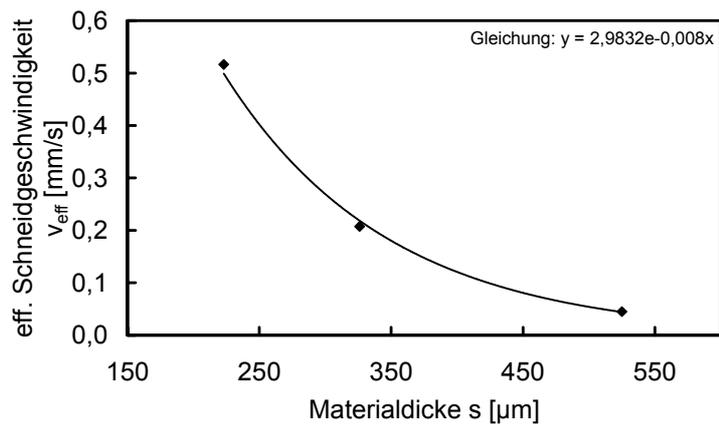


Abbildung 2.10: effektive Schneidgeschwindigkeit

Wie erwartet, wächst die notwendige Anzahl Überfahrten mit steigender Materialdicke stark an. Dazu umgekehrt verhält sich die effektive Schneidgeschwindigkeit. Mit zunehmender Materialdicke nimmt diese stark ab. Das Diagramm in *Abbildung 2.10* lässt einen exponentiellen Zusammenhang annehmen.

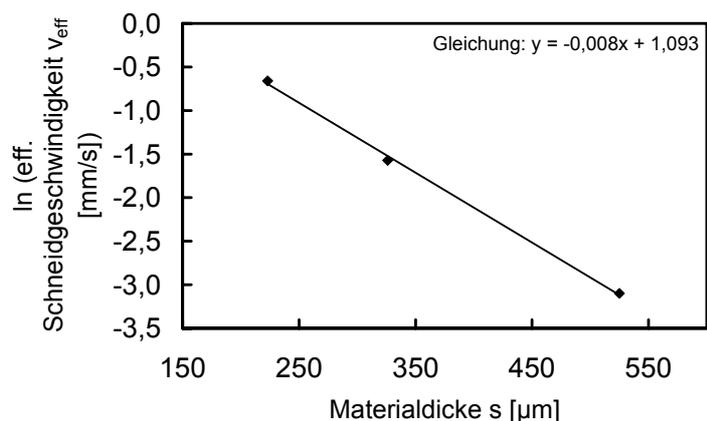


Abbildung 2.11: effektive Schneidgeschwindigkeit logarithmisch

Um dies zu belegen ist der natürliche Logarithmus für die auf der Größenachse aufgetragenen Werte der effektiven Schneidgeschwindigkeit gebildet worden. Daraus ergibt sich der in *Abbildung 2.11* dargestellte lineare Zusammenhang.

Der erwartete Effekt einer Verbreiterung der Schnittfuge am Strahlaustritt bei nahezu konstanter Schnittfugenbreite am Strahleintritt, konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Unter Berücksichtigung einer abgeschätzten Messungenauigkeit (zufälliger Fehler) zwischen $2\ \mu\text{m}$ und $10\ \mu\text{m}$ bei der optischen Messung ist die Schnittfugenbreite am Strahlaustritt als konstant zu betrachten (*Abbildung 2.12*).

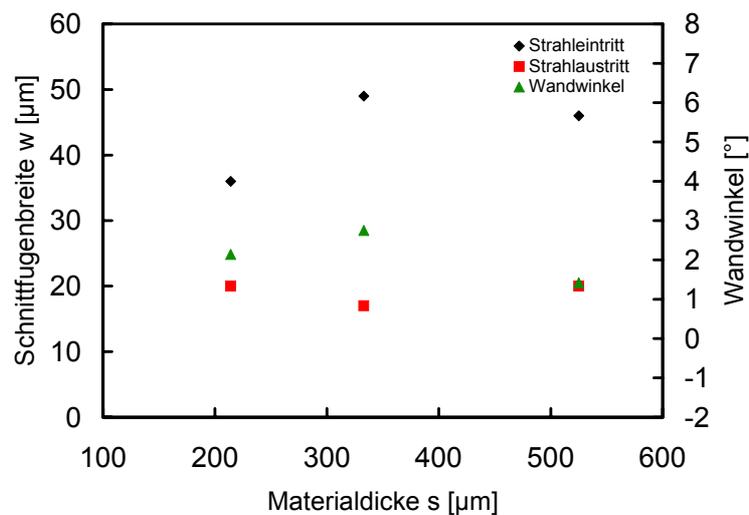


Abbildung 2.12: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel

Ebenso sind Unterschiede der Schnittfugenbreiten am Strahleintritt auf Prozessschwankungen, wie beispielsweise Materialunterschiede oder Schwankungen der Strahlqualität und Laserleistung zurückzuführen. Der Neigungswinkel der Schnittflanken liegt im Mittel bei ca. 2° (positiv konische Schnittfuge) und wird maßgeblich von der Schnittfugenbreite am Strahleintritt bestimmt. Dass mit zunehmender Materialdicke eine größere Menge an Material abgetragen werden muss, belegen die *Abbildungen 2.13 und 2.14*. Der Verlauf der Ablagerungsausdehnung zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der abgetragenen Materialdicke.

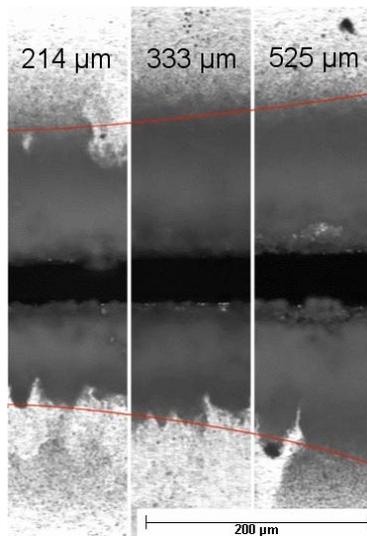


Abbildung 2.13:
Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahleintritt)

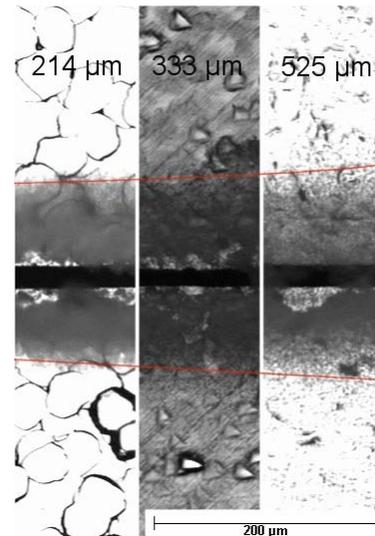


Abbildung 2.14:
Schnittfuge mit Ablagerungen (Strahlaustritt)

Mit steigender Materialdicke ist eine Zunahme der Ablagerungen zu verzeichnen. Die Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite fallen tendenziell geringer aus als auf der Strahleintrittsseite. Neben der Theorie des Einflusses der Laserstrahlkaustik auf Schnittfugenbreiten, ist noch ein zweiter Effekt von Bedeutung. Mit zunehmender Materialdicke werden die Verluste durch Wärmeleitung größer. Dieser Zusammenhang kann u.a. zur Folge haben, dass die Wechselwirkungszone zwischen Material und Laserstrahl umgebenden Bereiche aufgrund effizienterer Energieabführung weniger stark aufgeschmolzen bzw. verdampft werden und somit schmalere Schnittfugen und ein geringerer Materialaustrieb begünstigt werden. Höchste Schneidgeschwindigkeiten (ca. 0,52 mm/s) sowie geringere Ablagerungen bei ähnlichen Schnittfugenbreiten und Wandwinkeln sind für kleine Materialdicken (ca. 220 μm) erreicht worden.

2.3.2 Kristallorientierung

Welchen Einfluss die Kristallorientierung auf das Bearbeitungsergebnis d.h. auf Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität hat, soll im folgenden untersucht werden. An dieser Stelle ist auf die Grundlagen zum Kristallaufbau von Silizium zu verweisen.

Gemäß Punkt 1.3.1 wird beim $\langle 100 \rangle$ -Wafer eine stärkere Kristallrichtungsabhängigkeit erwartet. Speziell beim Schneiden parallel und senkrecht zum Flat¹⁾ entlang der weniger stark besetzten $\{100\}$ -Ebenen mit niedrigerer Bindungsdichte werden höhere Schneidgeschwindigkeiten aber geringere Schnittfugenbreiten unterstellt.

Beim Schneiden quer zu der mit der $\langle 100 \rangle$ -Richtung vorgegebenen Kristallorientierung werden breitere Schnittfugen und ggf. unregelmäßigere Schnittkanten aufgrund der Sprödigkeit des Siliziums erwartet.

Im Vergleich dazu wird beim $\langle 111 \rangle$ -Material aufgrund der dichter besetzten $\{111\}$ -Kristallebenen mit tendenziell geringeren Schneidgeschwindigkeiten gerechnet, da insgesamt mehr Energie zum Aufbrechen der Bindungen aufgewendet werden muss. [21]

Zur Feststellung eines Einflusses der Schneidrichtung bzw. Kristallorientierung auf die Schneidgeschwindigkeit wurde die Schneidkontur (Quadrat) zu einem Rechteck mit 10 mm x 4 mm Kantenlänge erweitert. Die lange Seite gleichgerichtet zu der zu untersuchenden Kristallorientierung. Um den Einfluss der dazu senkrecht stehenden kurzen Kante auf das Schneidergebnis auszuschließen, wird diese mit 200 Überfahrten vorgeschritten. Da bei nicht rotationssymmetrischer Intensitätsverteilung des Laserstrahls im Fokus ausschließlich Schnittfugen erzielbar sind, deren Breite von der Schneidrichtung abhängt, wird anstelle der Laserstrahlauslenkung die Probenaufgabe auf dem x-y-z-Positioniertisch gedreht. Die Strahl- ablenkung erfolgte konstant in x-Richtung mit einer gleichförmigen Scangeschwindigkeit von 50 mm/s. Weitere Verfahrensparameter wie die Laserparameter ($P = 3\text{W}$; $f_{\text{Rep}} = 10\text{ kHz}$; zirkular polarisiert) sowie die Fokussierungseigenschaften ($f = 100\text{ mm}$; Fokusslage: $\pm 0\text{ mm}$; Werkstückoberseite) sind während der Messung nicht verändert worden.

Es wurden Wafer mit den Orientierungen $\langle 100 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$ mit nahezu gleicher Materialdicke von ca. $(210 \pm 10)\ \mu\text{m}$ an Luft geschnitten.

Die gemessenen Größen sind über dem Drehwinkel aufgetragen, wobei 0° im Falle des $\langle 100 \rangle$ -Wafers ein Schneiden parallel zum Flat bedeutet. Bei dem $\langle 111 \rangle$ -Wafer ist eine Zuordnung wegen fehlender Markierung nicht möglich.

Daher stimmen auch die Richtungs- bzw. Winkelangaben bei der Darstellung der effektiven Schneidgeschwindigkeit und der Schnittfugenbreiten bzw. Ablagerungen nicht überein.

¹⁾ Kennzeichnung der Lage des kubischen Gitters in der Siliziumscheibe durch Zuordnung einer Oberflächenorientierung

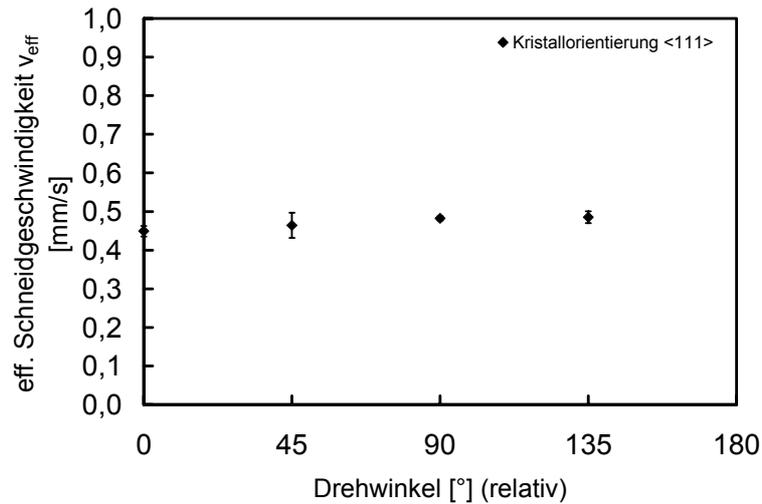


Abbildung 2.15: effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <111>-Wafer

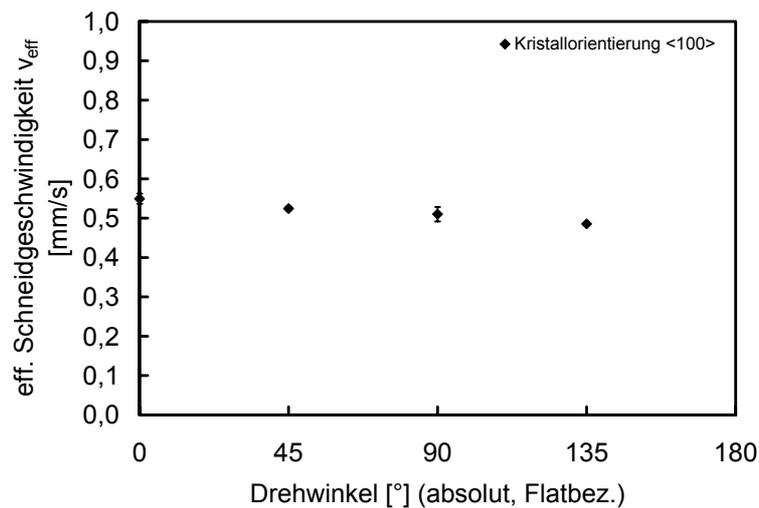


Abbildung 2.16: effektive Schneidgeschwindigkeit, gemessen bei einem <100>-Wafer.

Wie *Anhang A.2* und *Abbildung 2.15* zeigen, liegt die Geschwindigkeit beim Schneiden von <111>-Silizium wie erwartet um ca. 0,05 mm/s (= 9,6 %) geringfügig niedriger als die beim Schneiden des <100>-Materials (*Abbildung 2.16*). Die Unterschiede von maximal 0,04 mm/s (<111>) und 0,06 mm/s (<100>) der Schneidgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Schneidrichtung fallen ebenfalls gering aus. Es konnte jedoch somit eine stärkere Abhängigkeit der Wafer mit <100>-Orientierung ($\Delta v_{\text{eff.}}$: 10,9 %) gegenüber Wafern mit <111>-Orientierung ($\Delta v_{\text{eff.}}$: 8,2 %) nachgewiesen werden. Für das <100>-Material kann beim Schneiden parallel zum Flat bei 0° eine Vorzugsrichtung für hohe Prozessgeschwindigkeiten angenommen werden.

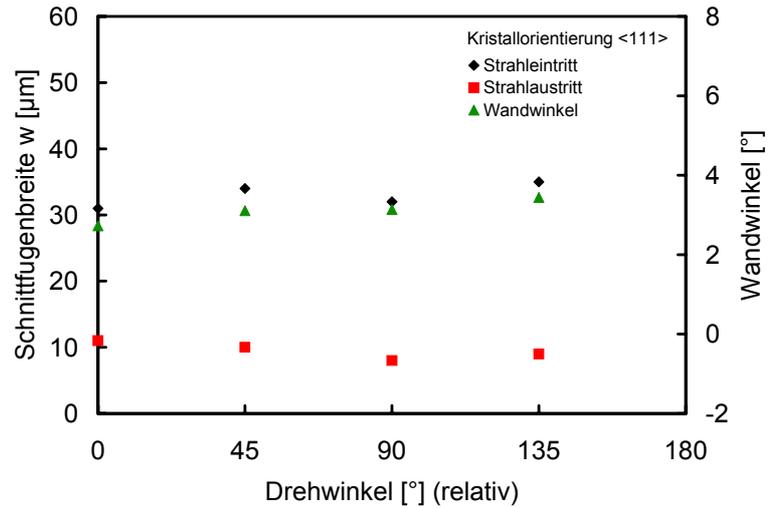


Abbildung 2.17: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel beim <111>-Wafer

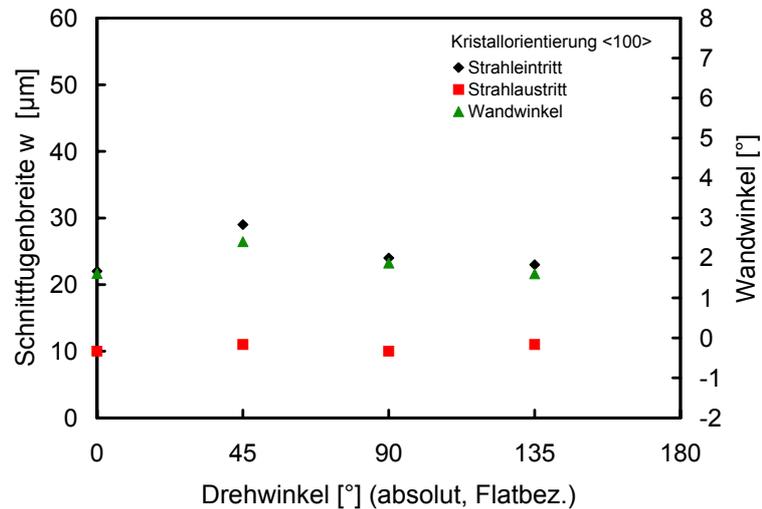


Abbildung 2.18: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel beim <100>-Wafer

An den Schnittfugenbreiten am Strahleintritt ist ebenfalls eine Kristallorientierungsabhängigkeit der Schnittfugegeometrie bzw. der Bearbeitungsqualität erkennbar. Bei den untersuchten Siliziumwafern zeigen sich für beide Kristallorientierungen (<100>, <111>) bei verschiedenen Schneidrichtungen unterschiedliche Schnittfugenbreiten. Dies belegen unter anderem die Diagramme in den *Abbildungen 2.17 und 2.18*. In *Abbildung 2.19* ergibt sich für den <100>-Wafer beim Schneiden parallel zum Flat (0°) in Richtung der Kristallorientierung mit 22 µm die schmalste Schnittfuge, während die breiteste Schnittfuge (*Abbildung 2.20*) beim Schneiden diagonal zur Kristallorientierung (45°) mit 29 µm gemessen wurde.

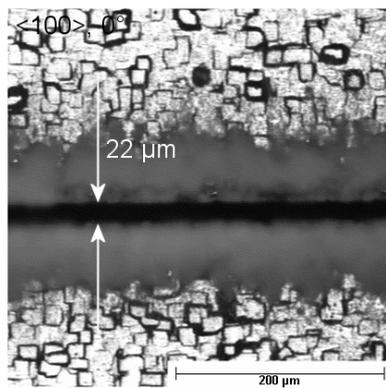


Abbildung 2.19:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt
für $\langle 100 \rangle$ -Silizium beim Schneiden
parallel zum Flat (0°)

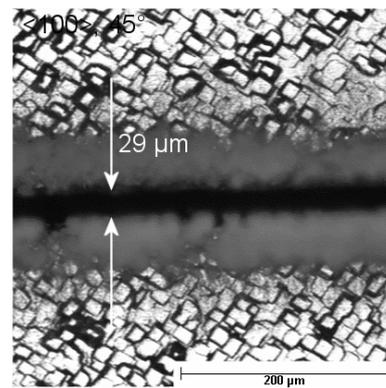


Abbildung 2.20:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt
für $\langle 100 \rangle$ -Silizium beim Schneiden
diagonal zum Flat (45°)

Die schmalste Schnittfuge von $31 \mu\text{m}$ beim $\langle 111 \rangle$ -Wafer (*Abbildung 2.22*) ist damit um ca. $10 \mu\text{m}$, die breiteste Schnittfuge (*Abbildung 2.24*) um $6 \mu\text{m}$ größer als jene des $\langle 100 \rangle$ -Wafers (*Abbildungen 2.21 und 2.23*). Dagegen sind die Schnittfugenbreiten zwischen 8 und $11 \mu\text{m}$ am Strahlaustritt im Rahmen der Messungengenauigkeit als gleich d.h. Kristallrichtungsunabhängig anzusehen.

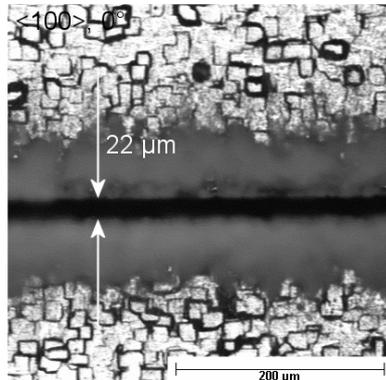


Abbildung 2.21:
schmale Schnittfuge am Strahleintritt
für $\langle 100 \rangle$ -Silizium

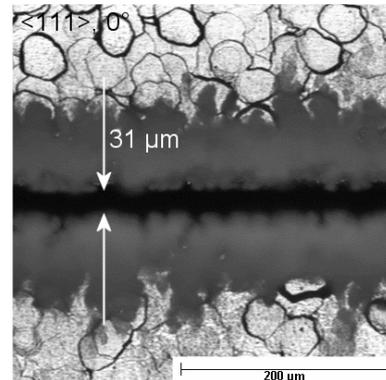


Abbildung 2.22:
schmale Schnittfuge am Strahleintritt
für $\langle 111 \rangle$ -Silizium

Die Wandwinkel verhalten sich entsprechend den Schnittfugenbreiten am Strahleintritt. Diese liegen bei den $\langle 111 \rangle$ -Wafers mit ca. 3° (positiv konisch) um 1° höher als bei den $\langle 100 \rangle$ -Wafers mit ca. 2° (*Abbildungen 2.17 und 2.18*).

Die umfangreichsten Ablagerungen befinden sich in einem Bereich mit einer Gesamtausdehnung von ca. $200 \mu\text{m}$ um die Schnittfuge (*Abbildungen 2.21 bis 2.24*). In Abhängigkeit von der Breite der erzeugten Schnittfuge sind die oxidierten Schmelzeablagerungen an den Schnittkanten bei $\langle 100 \rangle$ - und $\langle 111 \rangle$ -Wafers unterschiedlich stark ausgeprägt.

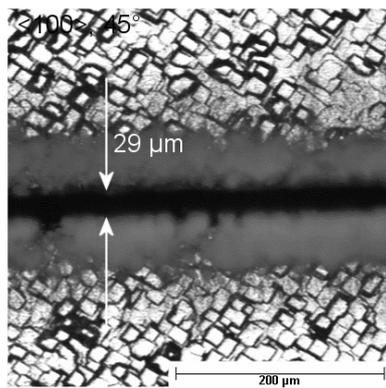


Abbildung 2.23:
breite Schnittfuge am Strahleintritt
für <100>-Silizium

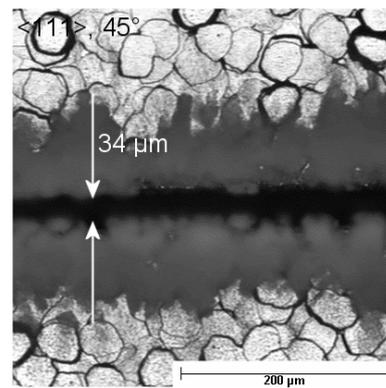


Abbildung 2.24:
breite Schnittfuge am Strahleintritt
für <111>-Silizium

Für <111>-Wafer fallen diese im Mittel um ca. 40 µm mächtiger aus als für <100>-Wafer. Es haben sich auch in um einige Zentimeter entfernten Gebieten Partikel abgelagert, so dass nahezu der gesamte Wafer mit feinen Siliziumstaubpartikeln kontaminiert ist.

Die höchsten effektiven Schneidgeschwindigkeiten sowie die schmalsten Schnittfugenbreiten am Strahleintritt, wurden somit beim Schneiden von <100>-orientiertem Silizium parallel (ca. 0,55 mm/s) und senkrecht (ca. 0,52 mm/s) zum Flat d.h., in Richtung der Kristallorientierung erzielt. Wandwinkel und Ablagerungen fielen ebenfalls vergleichsweise geringer aus.

2.3.3 Oberflächenrauigkeit

Von der Bearbeitung metallischer Oberflächen ist bekannt, dass ein Einfluss von Oberflächeneigenschaften auf den Materialabtrag existiert. Insbesondere haben diverse Fremdschichten wie beispielsweise Oxide sowie die Oberflächenrauigkeit einen Einfluss auf den Reflexionsgrad und damit auf die Oberflächenabsorption des Werkstoffs.[8,10, 28]

Wegen einer hohen erforderlichen Oberflächengüte sind die Siliziumscheiben mindestens auf einer Seite poliert (Bearbeitungsseite). Für dieses ähnlich den Metallen hochreflektierende Material liegt somit die Untersuchung des Oberflächeneinflusses auf den Materialabtrag nahe.

Da es jedoch während der Bearbeitung aufgrund des beginnenden Materialabtrages zu einer physikalischen Veränderung der Materialoberfläche (veränderte Oberflächenform, Ausbildung einer Oxidschicht) sowie des Materials selbst kommt, ist davon auszugehen, dass sich der Oberflächeneinfluss auf den Abtrag der ersten Materiallagen beschränkt. Diese Prozesseigenschaft, bei der schon für den nächstfolgenden Puls wesentlich veränderte Abtragsbedingungen gelten, wird als Inkubation bezeichnet. [21]

Ein 215 μm dicker Siliziumwafer mit einseitig polierter Oberfläche wurde dabei nach dem unter Punkt 2.2 beschriebenen Verfahren jeweils von beiden Seiten geschnitten. Danach wurden die dabei erzielten Ergebnisse verglichen. Folgende Parameter können dabei als konstant betrachtet werden: die Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), die Fokussierung ($f = 100 \text{ mm}$; Fokusslage: $\pm 0 \text{ mm}$; Werkstückoberseite) sowie die Scangeschwindigkeit ($v_{\text{scan}} = 100 \text{ mm/s}$).

Bei den Versuchen konnte kein nennenswerter Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Schneidgeschwindigkeit festgestellt werden. Die effektiven Schneidgeschwindigkeiten von ca. 0,3 mm/s sind im Rahmen der Messgenauigkeit (ca. 0,03 mm/s) als gleich anzusehen (*Anhang A.3*).

Interessant ist jedoch ein möglicher Einfluss auf die Schnittfugenbreite am Strahleintritt, der unter den oben genannten Bedingungen erzeugten Schnitte. In *Abbildung 2.25 und 2.26* sind die Schnittfugen am Strahleintritt für die polierte und die geschliffene bzw. geätzte Oberfläche gegenüber gestellt. Die bei der Bearbeitung von Seiten der polierten Oberfläche des Siliziumwafers entstandene Schnittfuge ist mit ca. 40 μm im Mittel um ca. 8 μm größer als die bei einer weniger stark reflektierenden Materialoberfläche (32 μm). Dementsprechend sind auch die Ablagerungen auf der Strahleintrittsseite bei der polierten Probe um ca. 100 μm weiter ausgedehnt und der Wandwinkel mit $3,0^\circ$ ca. doppelt so groß wie bei der geschliffenen bzw. geätzten Probe. Die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt hingegen, weisen im Rahmen der Messgenauigkeit keinen Unterschied auf (*Abbildungen 2.27 und 2.28*).

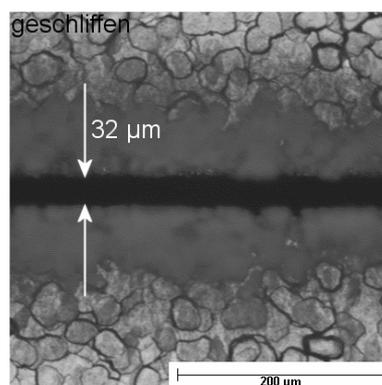


Abbildung 2.25:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt
für die geschliffene/geätzte Oberfläche

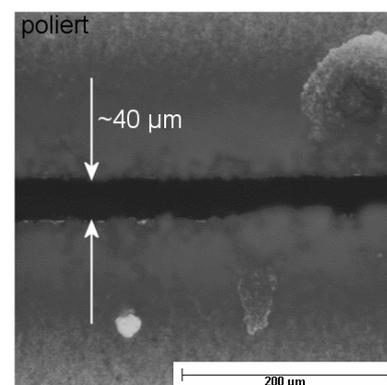


Abbildung 2.26:
Schnittfugenbreite am Strahleintritt
für die polierte Oberfläche

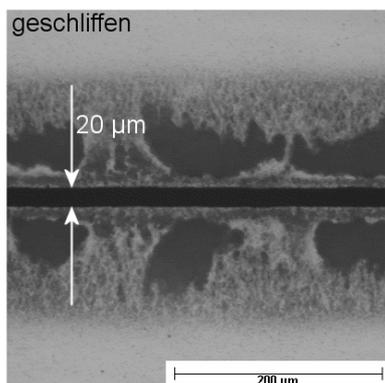


Abbildung 2.27:
Schnittfugenbreite am Strahlaustritt
für die geschliffene/geätzte Oberfläche

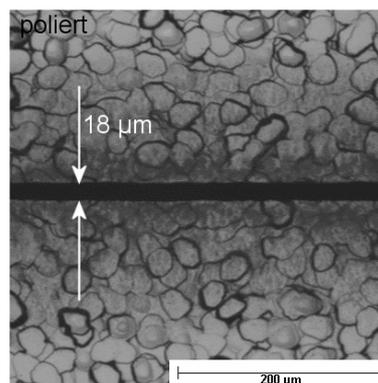


Abbildung 2.28:
Schnittfugenbreite am Strahlaustritt
für die polierte Oberfläche

Die Ursache für eine breitere Schnittfuge am Strahleintritt ist in der Oberflächenvorbehandlung selbst zu sehen. Aufgrund des Schleifens und Polierens können Spannungen und Gitterdefekte in der Waferoberfläche entstehen, die eine Materialzerstörung an der Stelle des Abtrags unterstützen. Weiterhin besteht die Möglichkeit eines unterschiedlichen Oxidationszustandes der beiden Oberflächen aufgrund ihrer unterschiedlichen vorangegangenen Behandlung. An Luft sind alle Siliziumoberflächen mit einer nur wenige nm dünnen Oxidschicht, welche sich bereits bei Raumtemperatur ausbildet, bedeckt. Wie bei anderen hochreflektierenden Materialien (z.B. Metallen) nachgewiesen, begünstigen Oxidschichten die Strahlungseinkopplung ins Material. Somit besteht die Möglichkeit, dass eine unterschiedliche Oberflächenstruktur infolge unterschiedlich ausgebildeter Oxidschichten auch einen Einfluss auf Schmelzebildung, Materialaustrieb und die Ausbildung lose aufgeworfener Oxidablagerungen hat. Eine andere Möglichkeit zur Erklärung dieses Effekts, dass bei polierten Oberflächen zum Teil breitere Schnittfugen am Strahleintritt entstehen, ist in der geringeren Oberflächenrauigkeit an sich zu sehen. Eventuell werden durch die kleineren Rauheitsspitzen und dadurch auch unterschiedliche Strahleinfallswinkel diffuse Reflexionen weitgehend vermieden und somit die Laserstrahlung besser in das Material geleitet. Eine somit höhere Strahlungsabsorption ist auch eine Begründung für eine geringere Schmelzebildung, einen stärkeren Materialaustrieb in Form feiner Partikel und damit weniger stark zugesetzten Schnittfugen.

Wenngleich kein Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Probe auf die Prozessgeschwindigkeit festgestellt werden konnte, besteht doch ein geringfügiger Einfluss auf die Schnittfugenbreite am Strahleintritt sowie Ausdehnung und Ausbildung der Ablagerungen. Polierte Waferoberflächen weisen geringere Schmelzeablagerungen an den Schnittkanten und damit eine breitere Schnittfuge sowie eine verstärkte Materialablagerung in Form feiner Partikel in einem größeren Bereich um die Schnittfuge auf.

2.4 Einfluss von Laserparametern

2.4.1 Polarisation

Untersuchungsergebnisse beim Schneiden von Stahlblech mit CO₂- und cw-Nd:YAG-Lasern haben gezeigt, dass die Richtung der Strahlungspolarisation bezogen auf die Schneidrichtung beim Laserstrahlschneiden zu unterschiedlichen richtungsabhängigen Ergebnissen führen kann. Dabei wurde nachgewiesen, dass eine eindeutige Abhängigkeit der maximalen Schneidgeschwindigkeit von der Schneidrichtung relativ zur Polarisations Ebene (*Abbildung 2.29*) besteht.

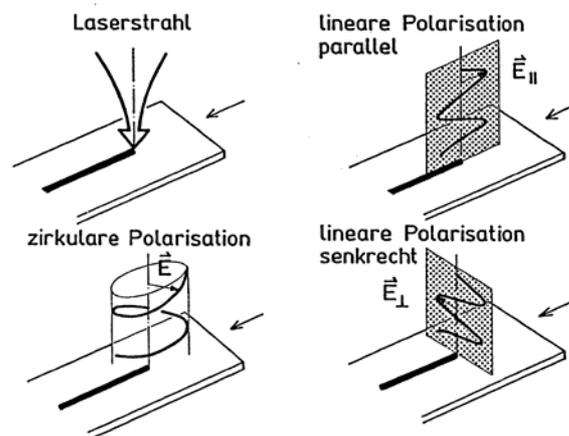


Abbildung 2.29: Orientierung der Polarisationsrichtung zur Schneidrichtung (schematisch) [27]

Stahlblech definierter Dicke konnte ca. doppelt so schnell parallel zur linearen Polarisation wie senkrecht dazu geschnitten werden. Die maximal erzielbare Schneidgeschwindigkeit mit zirkular polarisiertem Licht lag dabei zwischen den mit linear polarisiertem Licht parallel und senkrecht zur Schneidrichtung erzielten Geschwindigkeiten.

Ebenso wurde ein Zusammenhang zwischen Fugenbreite sowie Rechtwinkligkeit der Schnittflächen und der Lage der Polarisationsrichtung festgestellt. Beim Schneiden parallel zur linearen Polarisation ergaben sich geringere Schnittfugenbreiten als senkrecht dazu. Weiterhin wurden zur Oberfläche senkrechte Schnittfugen nur beim Schneiden entweder parallel oder senkrecht zur linearen Polarisation erzielt.

Grund dafür ist die Abhängigkeit des Reflexionsgrades und damit auch des Absorptionsgrades vom Einfallswinkel und dem Polarisationszustand des Laserlichts bezogen auf die Einfallsebene. Obwohl die Intensität im Strahlquerschnitt radialsymmetrisch verteilt ist, führt die Polarisationsabhängigkeit der Strahlungsabsorption zu einem richtungsabhängigen Anstei-

gen der Absorption an der Schneidfront unter wachsendem Einfallswinkel, wenn die Vorschubrichtung in der Polarisationssebene liegt. Aufgrund der Dynamik des Schneidvorgangs liegt die Schneidfront häufig nicht senkrecht zur Werkstückoberfläche, sondern weicht mit zunehmender Schnitttiefe von der Senkrechten ab. Die Laserstrahlung fällt somit nicht im 90° -Winkel auf die Werkstückoberfläche ein. Infolge des unterschiedlichen Absorptionsvermögens in Abhängigkeit von paralleler bzw. senkrechter Polarisationsrichtung führt dies im Resultat zu unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten und Schnittfugenbreiten.[3,10,14,28]

Um den Einfluss der Polarisation auf die Schneidgeschwindigkeit zu untersuchen, wurde ein Rechteck von 4 mm x 10 mm Kantenlänge ausgeschnitten. Die längere Kante gibt dabei die Schneidrichtung an, welche in einem bestimmten Winkel zur Polarisationsrichtung steht. Der Einfluss der kürzeren Rechteckkante auf das Schneidergebnis wurde durch das Vorschneiden mit 200 zusätzlichen Überfahrten unterbunden. Ein möglicher Einfluss der Kristallorientierung ist durch das Mitdrehen des in eine tarierbare Halterung eingespannten Siliziumwafers mit der Scanrichtung (Strahlableitrichtung) des Laserstrahls vermieden worden. Es wurde $\langle 111 \rangle$ -Silizium unter konstant gehalten der Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$), Fokussierung ($f = 100 \text{ mm}$; Fokusbildung: $\pm 0 \text{ mm}$; Werkstückoberseite) und Verfahrensparameter ($v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$) in Abhängigkeit von der Strahlableitrichtung einmal mit Lambda-Viertel-Platte (zirkular polarisiert) und einmal ohne (linear polarisiert) geschnitten. Die Versuchsergebnisse sind in *Anhang A.4* zusammengestellt.

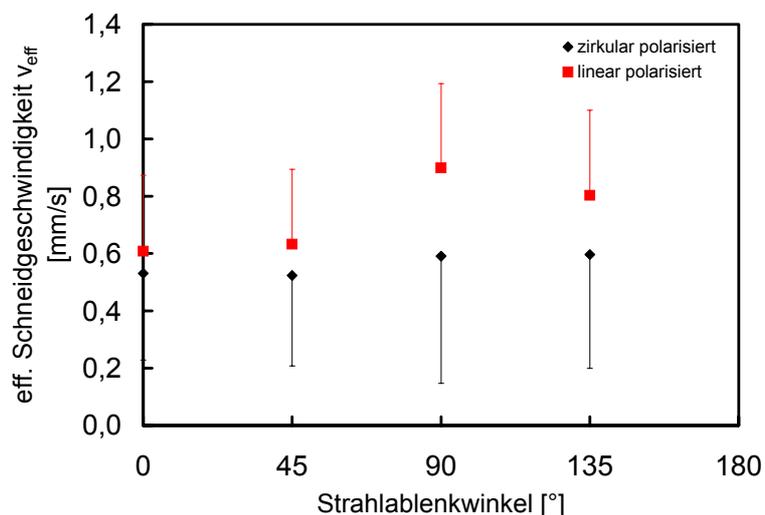


Abbildung 2.30: Schneidgeschwindigkeiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung

In *Abbildung 2.30* sind die erzielten effektiven Schneidgeschwindigkeiten über den Strahlableitwinkeln aufgetragen. Bei Vernachlässigung der Fehlerbalken deuten die für linear sowie zirkular polarisierte Laserstrahlung bei 90° sowie 135° erreichten Maximalwerte der

Schneidgeschwindigkeit (0,60 mm/s und 0,90 mm/s) auf eine Vorzugsorientierung der Polarisation zwischen diesen beiden Richtungen. Aufgrund des bei dieser Messung relativ hohen statistischen Fehlers, bedingt durch den starken Einfluss von Prozessschwankungen, können die ermittelten Werte für die vorgenannte Vermutung nicht als Beleg herangezogen werden.

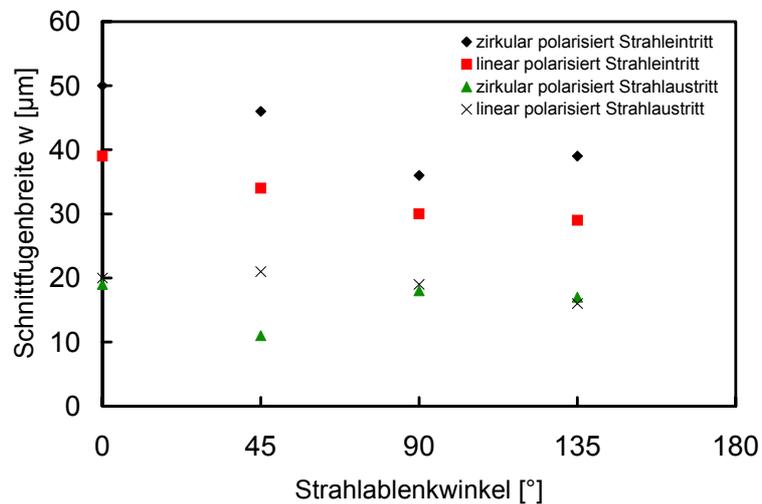


Abbildung 2.31: Schnittfugenbreiten für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung

Es ist jedoch festzustellen, dass mit zirkular polarisierter Strahlung die maximal erreichbaren Schneidgeschwindigkeiten im Mittel um 0,18 mm/s (ca. 24 %) niedriger liegen und eine Abhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses von der Strahlablenkrichtung beim Schneiden mit linear polarisierter Strahlung ($\Delta v_{\text{eff.}} = 0,29$ mm/s) stärker ausgeprägt ist als mit zirkular polarisierter Strahlung ($\Delta v_{\text{eff.}} = 0,08$ mm/s).

Wie durch Vergleich der *Abbildungen 2.30 und 2.31* ersichtlich, korrespondieren wie im voraus angenommen schmalere Schnittfugen mit höheren Schneidgeschwindigkeiten und umgekehrt. Die Werte für die mit zirkular polarisierter Laserstrahlung erzeugten Schnittfugenbreiten liegen im Mittel um ca. 10 µm höher als die mit linear polarisierter Laserstrahlung erzeugten Breiten. Beim Schneiden mit linear polarisierter Laserstrahlung sind somit schmalere Schnittfugen (*Abbildung 2.31*) sowie eine geringere Ausdehnung der Ablagerungen erreichbar.

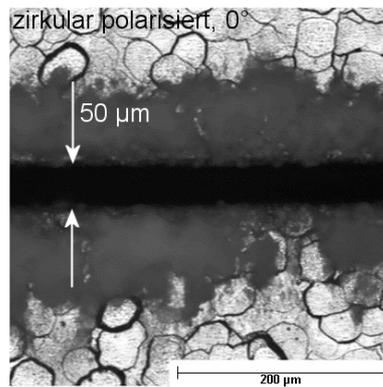


Abbildung 2.32:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel 0°) für linear polarisierte Laserstrahlung

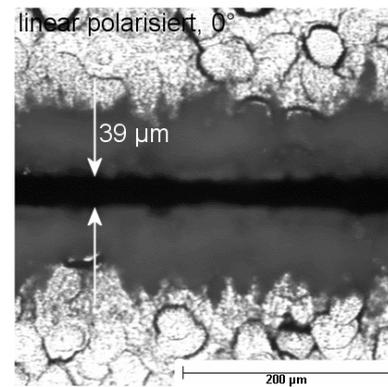


Abbildung 2.33:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) bei horizontaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel 0°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung

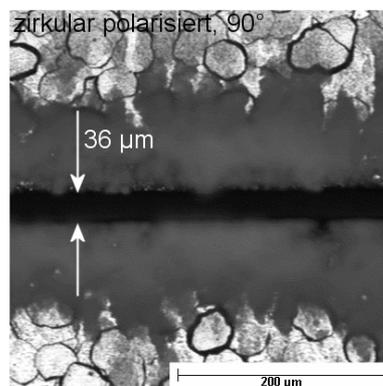


Abbildung 2.34:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) für das Schneiden mit vertikaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel: 90°) für linear polarisierte Laserstrahlung

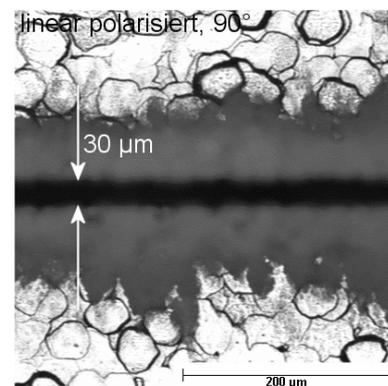


Abbildung 2.35:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt) für das Schneiden mit vertikaler Strahlableitung (Strahlableitungswinkel: 90°) für zirkular polarisierte Laserstrahlung

Diesen Zusammenhang belegen auch die Mikroskopaufnahmen der *Abbildungen 2.32 und 2.33*. Mit $39\ \mu\text{m}$ Schnittfugenbreite am Strahleintritt ist die Schnittfuge beim Schneiden mit linear polarisiertem Strahl $11\ \mu\text{m}$ schmaler als beim Schneiden mit zirkular polarisiertem Strahl ($50\ \mu\text{m}$) bei gleicher Schneidrichtung. Bei Vergleich von *Abbildung 2.32* mit *Abbildung 2.34* sowie *Abbildung 2.33* mit *Abbildung 2.35* wird deutlich, dass sowohl für lineare als auch für zirkulare Polarisierung beim Schneiden in vertikaler Richtung (Strahlableitungswinkel: 90°) kleinere Schnittfugenbreiten als beim Schneiden in horizontaler Richtung (Strahlableitungswinkel 0°) entstanden sind. Im Gegensatz zu den Schneidgeschwindigkeiten liegen die Unterschiede hier bei der Bearbeitung mit zirkular polarisiertem Strahl wesentlich höher ($\Delta w = 14\ \mu\text{m}$) als bei der Bearbeitung mit linear polarisiertem Strahl ($\Delta w = 9\ \mu\text{m}$). Anhand der *Abbildungen 2.32 bis 2.35* konnte somit die These belegt werden, dass die Vorzugsrichtung (Polarisati-

onsrichtung) beim Arbeiten mit einem Strahlablenwinkel von 90° annähernd parallel zur Schneidrichtung liegt.

Die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt sind im Rahmen der Messtoleranzen als konstant zu betrachten. Der Messwert bei 45° am Strahlaustritt für zirkular polarisierte Laserstrahlung ist mit einem prozessschwankungsbedingten unvollständigen Durchschnitt der Probe an dieser Stelle zu begründen und daher zu vernachlässigen.

Entsprechend der *Abbildungen 2.32 bis 2.35* kann eine Abhängigkeit der Ausdehnung der Hauptablagerungen und somit der Menge abgetragenen Materials von der Schnittfugenbreite abgeleitet werden. Die gemessenen Ablagerungsausdehnungen am Strahleintritt liegen zwischen ca. $230\ \mu\text{m}$ und $320\ \mu\text{m}$.

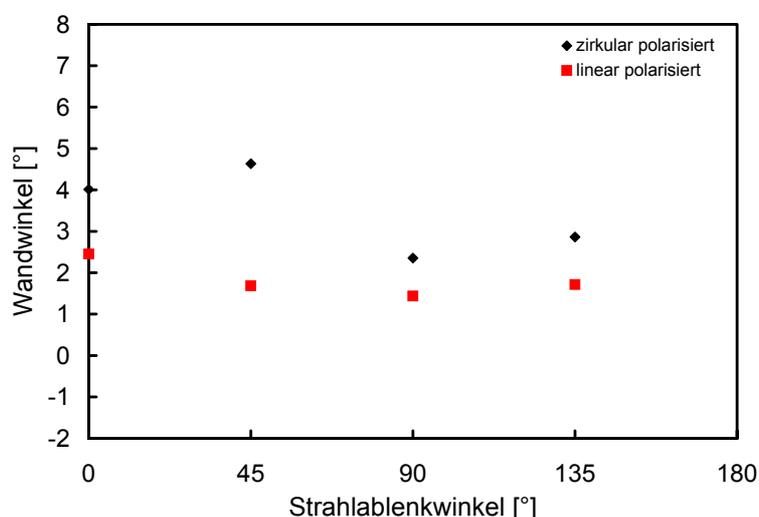


Abbildung 2.36: Wandwinkel für zirkular und linear polarisierte Laserstrahlung

Mit den tendenziell größeren Schnittfugenbreiten am Strahleintritt für zirkular polarisierte Laserstrahlung, ergibt sich auch eine größere Konizität der Schnittfuge. Bei einem mittleren Flankenwinkel von $1,8^\circ$ fallen die Schnittflächen für die Bearbeitung mit linear polarisierter Strahlung nahezu parallel aus und unterliegen wie auch die Schnittfugenbreiten einer geringeren schneidrichtungsabhängigen Varianz (*Abbildung 2.36*). Der Flankenwinkel bei der Bearbeitung mit zirkular polarisierter Strahlung beträgt im Mittel $3,5^\circ$ und variiert stärker in Abhängigkeit von der Schneidrichtung.

Die Ursache für eine zum Teil stärkere Abhängigkeit der Schnittqualität von der Schneidrichtung bei zirkular polarisiertem Laserstrahl, ist in einer schon vor Umwandlung in zirkular polarisierte Laserstrahlung nicht idealen linearen Polarisation zu sehen. Laut Hersteller besteht nach Auskopplung des Laserstrahls ein Verhältnis der linearen Polarisation zu Lichtwellen, die nicht in der angegebenen Polarisationsrichtung schwingen, von mehr als 25:1, d.h. weni-

ger als $1/25$ der Lichtwellen schwingen in einer anderen Richtung. Dazu kommt der Einfluss der Strahlführungsoptik. Zur Strahlumlenkung werden Universalspiegel verwendet, an Stelle von speziell für die lineare Polarisation ausgelegten Laserspiegeln. Diese tragen zusätzlich zu einer Verschlechterung der Polarisation des Laserstrahls bei. Das Vorliegen keiner idealen Vorzugsrichtung (lineare Polarisation) macht eine Umwandlung in eine von der Bearbeitungsrichtung unabhängig wirkende Polarisationsform (zirkulare Polarisation) im Sinne einer Richtungsunabhängigkeit des Laserschneidens (konstante Prozessqualität) unmöglich. Eine genaue Festlegung der Polarisationsrichtung ist u.a. aufgrund der Strahlablenkung mittels Scanner problematisch. In Abhängigkeit von der Amplitude der Strahlablenkung kann sich die Polarisationsrichtung durch die Reflexion des Laserstrahls an den bewegten Scannerspiegeln während der Bearbeitung drehen.

Die Untersuchung hat ergeben, dass maximale Prozessgeschwindigkeiten sowie schmalste Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und kleinste Flankenwinkel beim Schneiden mit linear polarisierter Laserstrahlung, d.h. ohne Lambda-Viertel-Platte, und einer Strahlablenkrichtung von 90° (vertikale Schneidrichtung) erzielt werden können.

2.4.2 Leistung

Für Laserstrahlbrennschneiden und -schmelzschneiden von Stahl mit CO_2 -Lasern ist bekannt, dass die Laserleistung auf die Schneidgeschwindigkeit sowie die Schnittspaltbreiten Einfluss hat. In grober Näherung gilt, dass die Abtragraten und damit die Schneidgeschwindigkeit proportional zur mittleren Laserleistung (Pulsenergie) ansteigt. Große Laserleistungen bedeuten aber gleichzeitig auch große Schnittfugenbreiten und Zunahme der Verunreinigungen auf der Oberfläche.[3,8,10,11,14, 28]

Der Einfluss der Laserleistung wurde entsprechend der Beschreibung in Punkt 2.2 bestimmt. Dabei wurde mit zwei Lasern unterschiedlicher Leistung (3 W, 10 W) bei maximaler Ausnutzung der jeweils verfügbaren Ausgangsleistung geschnitten. Für die weiteren Prozessparameter galt: Pulswiederholrate $f_{\text{Rep}} = 10$ kHz, Fokussierung $f = 100$ mm; Fokusslage ± 0 mm (Werkstückoberseite) sowie Scangeschwindigkeit $v_{\text{scan}} = 50$ mm/s. Geschnitten wurde $\langle 111 \rangle$ -Silizium an Luft mit zirkular polarisiertem Strahl (*Anhang A.5*).

Es ergaben sich ähnliche Zusammenhänge bei der Bearbeitung von Silizium wie bei der Bearbeitung von Stahl. Bei Nutzung der Laserleistung von 10 W wird eine Schneidgeschwindigkeit von ca. 1 mm/s erzielt; im Gegensatz dazu beträgt dieser Wert beim Schneiden mit

einer Laserleistung von 3 W ca. 0,5 mm/s. D.h., mit etwa dreifacher Laserausgangsleistung ist ca. die doppelte Schneidgeschwindigkeit erreichbar. Gleichzeitig betragen die gemessenen Schnittfugenbreiten am Strahleintritt mit 72 μm das 1,5-fache und am Strahlaustritt mit 61 μm das 2,3-fache bei Einsatz des 10 W Laser gegenüber Anwendung des Gerätes mit einer Leistung von 3 W (Abbildungen 2.37 bis 2.40). Entsprechend der Breite der Schnittfuge erstrecken sich die Ablagerungen des ablatierten Materials über größere Bereiche.

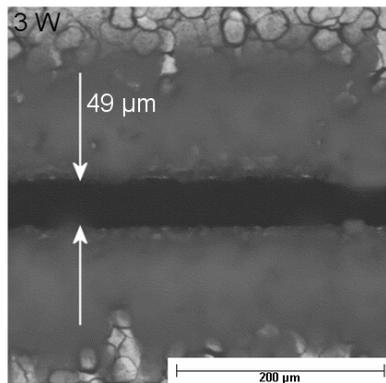


Abbildung 2.37:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt)
für 3 W Laserleistung

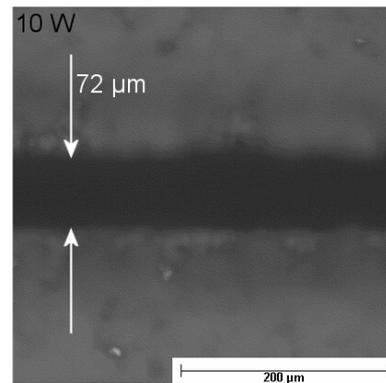


Abbildung 2.38:
Schnittfugenbreiten (Strahleintritt)
für 10 W Laserleistung

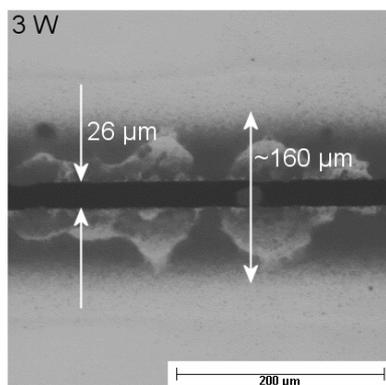


Abbildung 2.39:
Schnittfugenbreiten und Ablagerungen
(Strahlaustritt) für 3 W Laserleistung

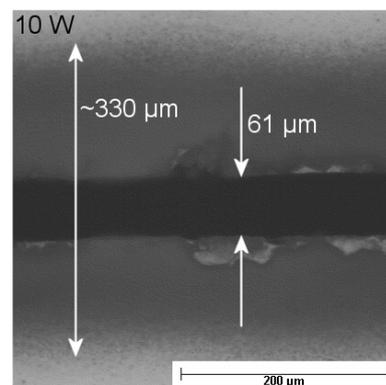


Abbildung 2.40:
Schnittfugenbreiten und Ablagerungen
(Strahlaustritt) für 10 W Laserleistung

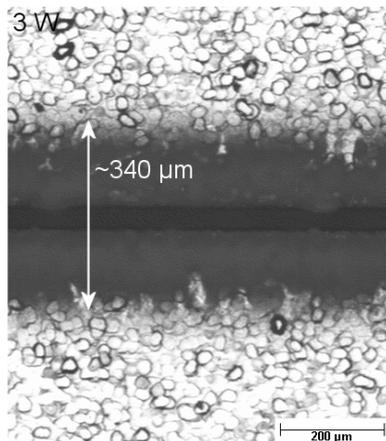


Abbildung 2.41:
Ablagerungen (Strahleintritt) für
3 W Laserleistung

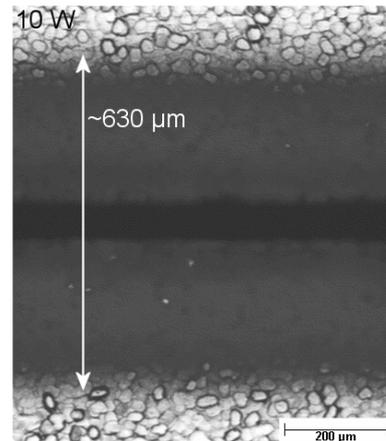


Abbildung 2.42:
Ablagerungen (Strahleintritt) für
für 10 W Laserleistung

Sowohl am Strahleintritt als auch am Strahlaustritt erstrecken sich die Ablagerungen der mit 10 W Laserleistung erzeugten Schnittlinien etwa auf die doppelte Breite (*Abbildungen 2.41, 2.42*). Beide Schnittfugen sind positiv konisch, wobei die Schnittfugen, welche mit 10 W Laserausgangsleistung entstanden sind, eine wesentlich höhere Neigung zur Parallelität (Flankenwinkel: $\alpha = 1,5^\circ$) aufweisen, als die mit 3 W Laserleistung bearbeiteten Proben (Flankenwinkel: $\alpha = 3,1^\circ$).

Grund für die Zunahme der Bearbeitungsgeschwindigkeit, der Fugenbreiten und der Ablagerungen ist die infolge einer höheren Laserstrahlintensität bzw. Pulsenergie dem Werkstück zugeführte größere Streckenenergie:

$$\varepsilon_{Str.} = \frac{P_W}{vS} \quad ; \quad (14)$$

P_W : mittlere Leistung am Werkstück, v : Schneidgeschwindigkeit (entspricht v_{eff}), s : Schneid-
dicke (Normierungsgröße).

Daraus resultiert ein stärkeres Aufheizen des Randbereichs der Wechselwirkungszone, die Erzeugung eines größeren Schmelzvolumens pro Laserpuls an der Schneidfront und ein stärkerer Materialaustrieb. Durch den verstärkten Materialaustrieb infolge zunehmender Temperatur und damit ansteigendem Dampfdruck beim Verdampfungsvorgang werden auch zunehmend Flüssigkeitsteilchen aus der Schmelze mitgerissen, für die nicht ausreichend Verdampfungsenergie aufgewendet wird. Dem entgegen wirkt allerdings eine stärkere Wärmeleitung infolge höherer eingebrachter Leistung.

Mit dieser Untersuchung wurde untermauert, dass maximale Prozessgeschwindigkeiten (ca. 1 mm/s) sowie annähernd parallele Schnittfugen bei höchstmöglicher Leistung (10 W) erreichbar sind. Gleichzeitig nehmen aber auch die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und am Strahlaustritt und dementsprechend auch die Ablagerungen abgetragenen Materials stark zu.

2.4.3 Pulswiederholfrequenz

Das Schneiden mit einer gütegeschalteten Laserstrahlquelle hat eine Bearbeitung mit einzelnen Pulsen zur Folge, die sich in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks relativ zum Strahl mehr oder weniger überdecken.

Veröffentlichungen ist zu entnehmen, dass dabei eine größte Schneidgeschwindigkeit mit dem Maximalwert der Pulsfolgefrequenz erreicht wird. Genauer gesagt existiert der höchste Wert der Schneidgeschwindigkeit genau dann, wenn die Abstände der einzelnen Laserpulse dem halben Puls- bzw. Laserstrahldurchmesser entsprechen.

Eine Einschränkung besteht darin, dass es mit Erhöhung der Pulsfolgefrequenz bei konstantem Laserstrahldurchmesser zu einem Absinken der Pulsenergie und damit auch der maximal erreichbaren Schneidgeschwindigkeit kommt.[8,28]

Wegen der starken Abhängigkeit der Laserausgangsleistung von der Pulswiederholfrequenz (Repetitionsrate) gestaltet sich eine Bewertung des Einflusses der Pulsfrequenz des Güteschalters schwierig. Deshalb musste der Einfluss einer Laserleistungsveränderung ausgeschlossen werden. Dazu wurde dem 10 W-Laser ein Attenuator (Strahlabschwächer) nachgeschaltet, über den eine konstante Leistung von 3 W eingestellt werden konnte. Der Ausgleich von Veränderungen der Laserausgangsleistung aufgrund einer Pulsfrequenzvariation erfolgte somit durch den Attenuator. Es wurde mit einer Laserleistung von $P = 3 \text{ W}$ mit einer konstanten Scangeschwindigkeit von $v_{\text{scan}} = 50 \text{ mm/s}$ Silizium an Luft geschnitten. Die Fokusslage wurde auf Probenoberfläche eingestellt (Fokusslage: $\pm 0 \text{ mm}$; $f = 100 \text{ mm}$). Die Repetitionsrate wurde zwischen 8 und 15 kHz in 1 kHz-Schritten variiert.

Eigene Untersuchungen (*Anhang A.6*) bestätigten die oben genannten Vorhersagen weitgehend.

Wie in *Abbildung 2.43* anhand des linearen Zusammenhangs ersichtlich, steigt die effektive Schneidgeschwindigkeit proportional zur Pulsfrequenz an und erreicht für eine Laserleistung von ca. 3 W bei der maximal einstellbaren Pulsfrequenz von 15 kHz einen maximalen Wert von ca. 0,65 mm/s.

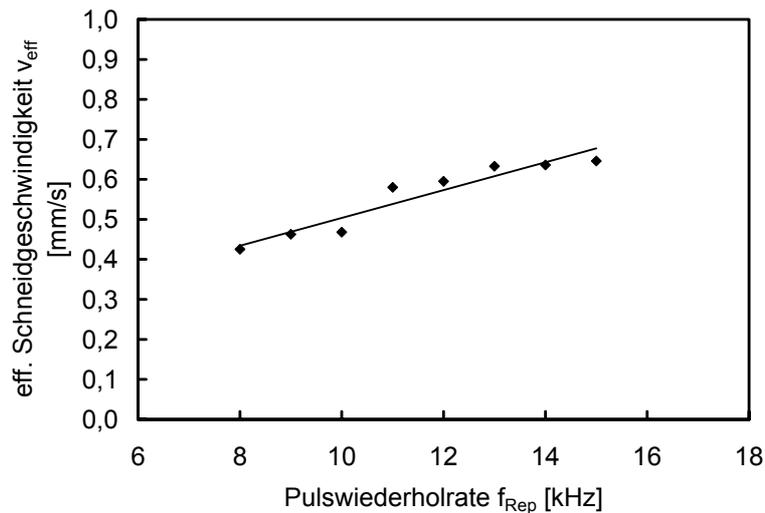


Abbildung 2.43: Schneidgeschwindigkeit

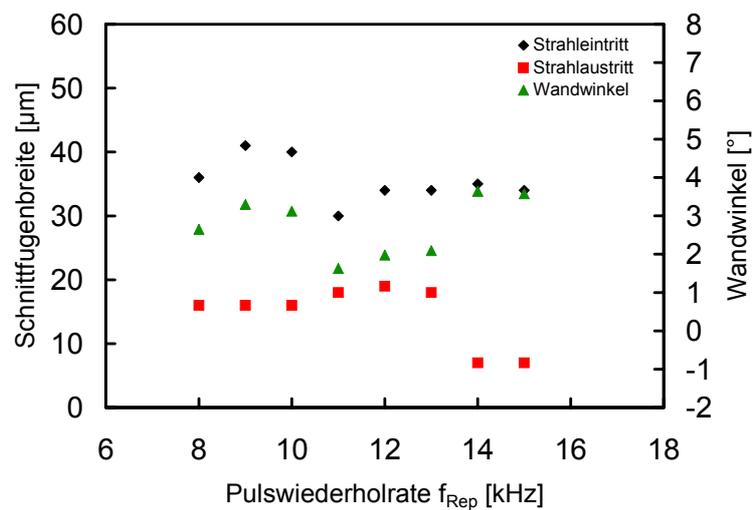


Abbildung 2.44: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel

Eine weniger eindeutige Tendenz weisen dagegen die Breiten der Schnittfugen sowie der Flankenwinkel (*Abbildung 2.44*) und auch die Ausdehnung der Kernzone der Ablagerungen auf (*Abbildungen 2.45 und 2.46*).

Aus den *Abbildungen 2.44 und 2.45* geht hervor, dass die Schnittfugenbreite am Strahleintritt, welche sich zwischen 30 μm und 40 μm bewegt, zunächst bis 11 kHz leicht abnimmt und danach wieder geringfügig ansteigt.

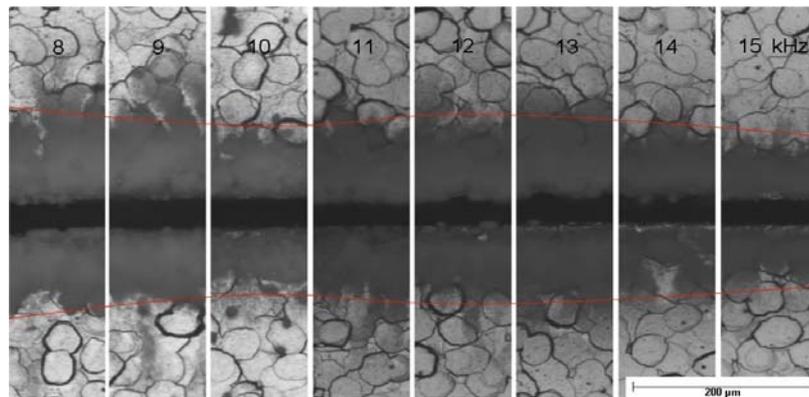


Abbildung 2.45: Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahleintritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederhol-
frequenz

Dazu entgegengesetzt verhalten sich die Schnittfugenbreiten am Strahlaustritt (*Abbildungen 2.44 und 2.46*), welche sich zwischen 7 µm und 19 µm bewegen und bei ca. 11 kHz etwas zunehmen und ab ca. 13 kHz wieder leicht abnehmen.

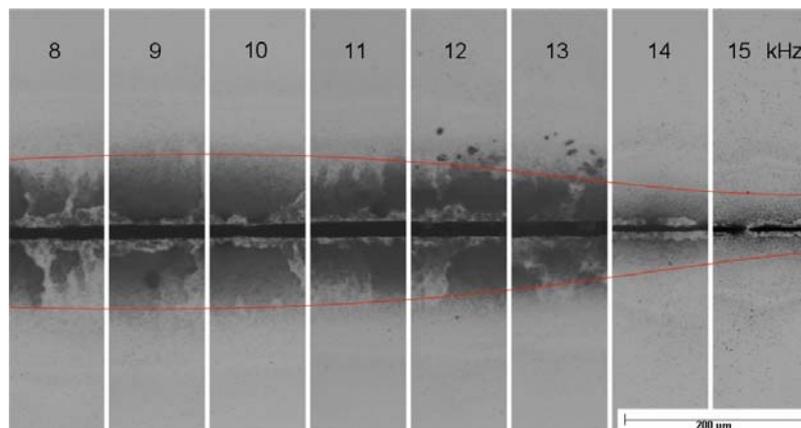


Abbildung 2.46: Schnittfugenbreite und Ablagerungen (Strahlaustritt) in Abhängigkeit von der Pulswiederhol-
frequenz

Für die Schnittfugen am Strahlaustritt bei 14 und 15 kHz ist teilweise kein vollständiger Durchschritt erreicht worden. Da eine nivellierbare Waferauflage im Einsatz war und zudem mit einer großen Schärfentiefe (Brennweite: $f = 100 \text{ mm}$) gearbeitet wurde, werden die Fehler in Schwankungen der Laserleistung und Strahlqualität gesehen.

Der Flankenwinkel und damit die Konizität der Schnittfuge verhält sich auch hier analog der Schnittfugenbreiten am Strahleintritt. Für eine Pulswiederholfrequenz von 11 kHz weist er einen geringsten Wert von $1,6^\circ$ auf; die Schnittflächen verlaufen dort annähernd parallel.

Im Gegensatz dazu zeigen gemessene Werte für die Ausdehnung der Ablagerungskernzone die Tendenz auf, dass sie mit zunehmender Repetitionsrate am Strahleintritt um ca. 100 µm und am Strahlaustritt um ca. 180 µm abnehmen.

In Bezug auf die effektive Schneidgeschwindigkeit haben die Untersuchungsergebnisse eine Analogie zu den bezüglich der Bearbeitung von Stahl getroffenen Aussagen belegt. Es konnte eindeutig aufgezeigt werden, dass die Abtragsrate eine Funktion der Pulsfolgefrequenz darstellt.

Die Ursache besteht darin, dass die gleiche Strecke in gleicher Zeit bei gleicher Geschwindigkeit mit einer höheren Anzahl an Einzelpulsen beaufschlagt wird, was zu einer Erhöhung der eingebrachten Streckenenergie führt und ähnliche Effekte wie unter 2.4.2 dargelegt nach sich zieht.

In Bezug auf die Ausbildung der Schnittfugen und der damit verbundenen Ablagerungen von abgetragenem Material sind jedoch aufgrund der kurzen Wechselwirkungszeiten (Pulsdauer) im Gegensatz zu den langen Auszeiten (Pulspausen) andere Effekte von größerer Bedeutung. Eine maßgebliche Rolle spielt hier der Überdeckungsgrad beim Abtrag mit Pulsfolgen. Der Grad der Überdeckung resultiert bei gleichbleibender Strahlwirkfläche direkt aus der Wegdifferenz zwischen den Einzelpulsen.

Dabei gibt es folgende Möglichkeiten:

- Der Abtrag wird zu einem bestimmten Anteil durch den nächsten Puls überdeckt;
- Es findet gerade keine Überdeckung mehr statt, da die Abtragsquerschnitte genau aneinander stoßen;
- Die Pulse werden so weit auseinander gezogen, dass sie beim Einzelabtrag perforieren und ihre Verteilung beim wiederholten Abtrag stochastisch ist.

Die Pulsratenabhängigkeit der Geschwindigkeit kann somit auch durch eine mit dem Überdeckungsgrad korrespondierende durchschnittliche Anzahl von Einzelabträgen beschrieben werden.[3,27]

In Abhängigkeit der Pulswiederholrate tritt bei einer festen Relativgeschwindigkeit von 50 mm/s zwischen Laserstrahl und Werkstück nur eine Verschiebung zwischen 3 μm (15 kHz) und 6 μm (8 kHz) zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen auf. Somit liegt bei einem praktischen Strahldurchmesser im Fokus von 23 μm nur eine geringfügige Änderung des Überlappungsgrades mit steigender Pulsfrequenz vor. Weil der Grad der Überlappung auch stark vom Vorschub, also der Scangeschwindigkeit abhängig ist und sich aufgrund deren größeren Einstellbereiches auch eine stärkere Veränderung der Pulsüberlappung ergibt, soll dieser Zusammenhang näher in Kapitel 2.6 untersucht werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass maximale (ca. 0,65 mm/s) Prozessgeschwindigkeiten und geringe Materialablagerungen bei maximaler Pulsfolgefrequenz (15 kHz) erreicht

wurden. Ein vollständiger Durchschnitt auf der Strahlaustrittsseite wurde dabei zum Teil nicht gewährleistet. Die schmalste Schnittfuge am Strahleintritt sowie ein kleiner Flankenwinkel ergab sich allerdings bei einer mittleren Frequenz der Pulsfolge von 11 kHz.

2.5 Fokusslage

Die Wirkungstiefe des fokussierten Laserstrahls basiert auf dessen Fähigkeit, auch tiefer liegende Bereiche im Werkstück zur vollständigen Trennung genügend aufzuheizen. Sie wird im wesentlichen durch die Laserstrahlleistung und die Schärfentiefe bestimmt. Diese entspricht dem Bereich der Strahlkaustik mit nur unwesentlicher Änderung der erforderlichen Intensität. Das Maß für die Schärfentiefe ist die Rayleighlänge z_R . Die Intensitätsverteilung in der Fokusebene sowie deren Veränderung entlang der Strahlachse oberhalb und unterhalb davon, ist für die Bestimmung der optimalen Fokusslage in Bezug auf das Werkstück von Interesse. Die Fokusslage ist definiert als der Abstand der schmalsten Ausdehnung des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche. Dabei wurde für die weitere Betrachtung festgelegt: Negative Defokussierung steht für eine Fokusslage über dem Werkstück ($z_f > 0$), positive Defokussierung liegt bei Fokusslage im Werkstück ($z_f < 0$) vor, bei einem Wert ,0' für die Defokussierung liegt die Fokusposition genau auf der Werkstückoberfläche ($z_f = 0$).[3,8,28]

Die Ermittlung der Abhängigkeit der effektiven Schneidgeschwindigkeit von der Fokusslage erfolgte durch Schneiden eines 336 μm dicken $\langle 111 \rangle$ -Siliziumwafers mit einer konstanten Scangeschwindigkeit von 50 mm/s an Luft. Dabei wurde der veränderliche Wertebereich der Defokussierung, d.h. die Lage der Fokusebene, welche sich am Probenmaterial orientiert, zwischen ca. $-0,2$ mm und $+0,6$ mm in 0,05 mm-Schritten variiert. Es erfolgte zunächst die Bestimmung der exakten Lage der Strahltaile relativ zur Probenoberfläche. Alle weiteren Parameter des Lasers ($P = 3$ W; $f_{\text{Rep}} = 10$ kHz; zirkular polarisiert) sowie der Fokussierung ($f = 100$ mm) wurden beibehalten.

Aus *Anhang A.7* werden diese Zusammenhänge ersichtlich. Für die effektive Schneidgeschwindigkeit ist eine deutliche Abhängigkeit von der Fokusslage herausgestellt worden (*Abbildung 2.47*). Es existiert ein konstanter Bereich maximaler Prozessgeschwindigkeit (ca. 0,22 mm/s) bei einer Fokusslage zwischen 0,05 mm und 0,20 mm unterhalb der Waferoberfläche. Dieser Bereich entspricht mit ca. 0,25 mm in etwa der praktischen Rayleighlänge für die Bearbeitungsoptik bei 100 mm Brennweite. Außerhalb dieses Bereiches fällt die effektive Schneidgeschwindigkeit stetig ab.

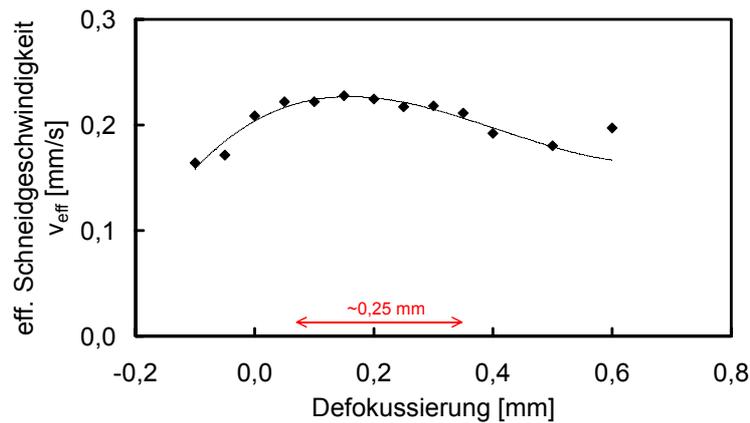


Abbildung 2.47: effektive Schneidgeschwindigkeit

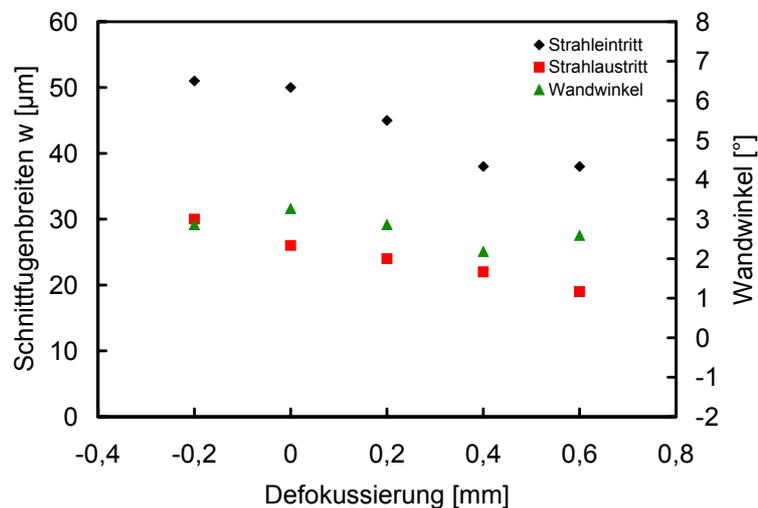


Abbildung 2.48: Schnittfugenbreite und Wandwinkel

Weiterhin wurden Schnitte von 210 μm starkem Silizium mit verschiedenen Defokussierungen in 0,20 mm-Schritten erzeugt.

Mit zunehmender Defokussierung in positiver Richtung nehmen die Schnittfugenbreiten von 51 μm auf 38 μm am Strahleintritt und von 30 μm auf 19 μm kontinuierlich ab (*Abbildung 2.48*). Entsprechendes gilt auch für die Ablagerungen am Strahlein- (ca. 340 μm bis 240 μm) sowie am Strahlaustritt (ca. 180 μm bis 170 μm) vor allem für Fokuslagen im Bereich um die Werkstückoberfläche. Diese liegen auf der Strahleintrittsseite (*Abbildung 2.49*) vorrangig in Form eines stark oxidierten Schmelzaufwurfs vor, wohingegen die Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite (*Abbildung 2.50*) eher von feinen Partikeln dominiert sind.

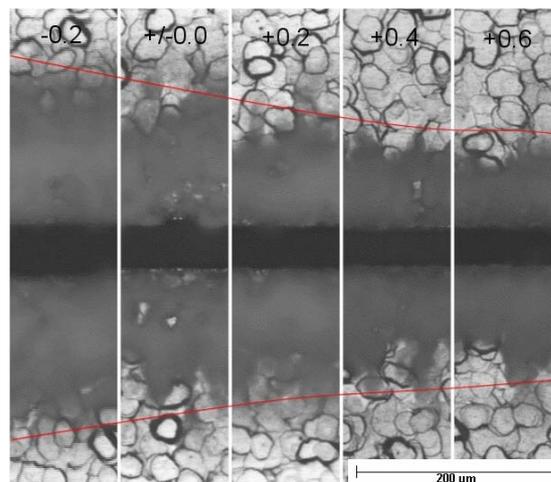


Abbildung 2.49: Schnittfugen (Strahleintritt) in Abhängigkeit von der Defokussierung

Da sich die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt und am Strahlaustritt nahezu im gleichen Verhältnis in Abhängigkeit von der Defokussierung ändern (Anstieg in *Abbildung 2.48*), besteht nur ein geringer Einfluss der Fokusslage in dem variierten Bereich auf den Flankenwinkel der Schnittkanten und somit die Konizität der Schnittfuge. Für die untersuchten Fokusslagen (oberhalb der Werkstückoberseite und unterhalb der Werkstückunterseite) ergaben sich V-förmige Schnittfugen (positiv konisch) mit Wandwinkeln zwischen $2,2^\circ$ und $3,2^\circ$ (*Abbildung 2.48*). Der kleinste Flankenwinkel mit $2,2^\circ$ für die Schnittfuge mit dem höchsten Maß an Parallelität wurde bei einer Fokusslage von 0,40 mm unterhalb der Waferoberfläche im Werkstück festgestellt.

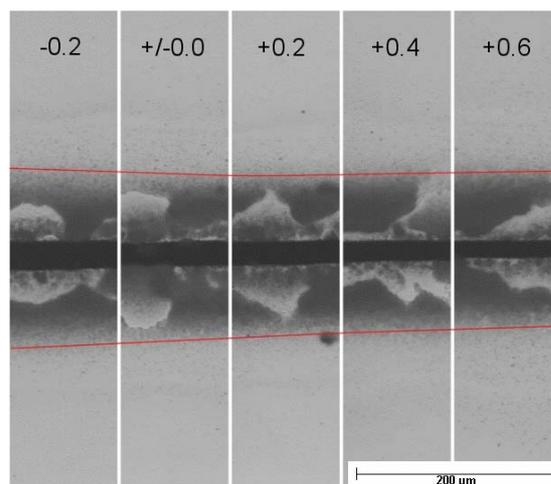


Abbildung 2.50: Schnittfugen (Strahlaustritt) in Abhängigkeit von der Defokussierung

Die Beschaffenheit des Materialabtrags in Abhängigkeit von der Fokusslage kann zum Teil auf bekannte Phänomene aus der Laserbearbeitung anderer Werkstoffe zurückgeführt wer-

den. Dabei beruht der Einfluss einer Variation der Fokusslage unter ansonsten gleichen Bedingungen wesentlich auf der Veränderung der Intensität auf der Werkstückoberfläche, hervorgerufen durch die Änderung des Strahldurchmessers. Somit verringert sich die Laserstrahlintensität in der Bearbeitungszone oberhalb und unterhalb des Fokus. Dies hat folgende Auswirkungen auf einen Mehrlagenabtrag mit Einstellung des Fokuspunktes der Bearbeitungsoptik auf die Werkstückoberfläche (Fokusslage: ± 0 mm) ohne Fokussnachführung: Mit zunehmender Anzahl der abgetragenen Lagen bzw. mit wachsender Abtragtiefe sinkt ohne Nachstellen des Fokus auf die aktuelle Oberfläche die Abtragsrate bedingt durch die Abnahme der Laserstrahlintensität. D.h., für Fokusslagen außerhalb der Strahltaile nimmt der Anteil an verdampften Material ab. – Unterhalb eines entsprechenden Schwellwertes kann der Abtragsprozess abbrechen.

Im Gegensatz zur Lasermakromaterialbearbeitung, wo maximale Abtragsraten bei einer Lage des Fokus auf der Materialoberfläche erreicht werden, treten beim Laserstrahlschneiden von Silizium maximale Abtragsraten bzw. Schneidgeschwindigkeiten dann auf, wenn der Fokus in das Material eintaucht. Somit muss ein höherer Teil der Strahlungsleistung im Materialinneren absorbiert worden sein. Da aber die an der Oberfläche absorbierte Strahlungsleistung mit Entfernung von der Strahltaile längs der Strahlausbreitungsrichtung abnimmt, führt ein geringeres Aufheizen des Materials zu schmaleren Schnittfugen und weniger Schmelzebildung. Die Abnahme der Schnittfugenbreite auf der Strahlaustrittsseite kann zusätzlich über Absorptionvorgänge im Material beschrieben werden, da der Abtragsprozess auch bei Lage des Fokus auf der Probenunterseite weiterhin von der Strahleintritts- zur Strahlaustrittsseite hin verläuft.

Die Wirkung von Absorptionseffekten längs der Strahlausbreitungsrichtung beim Durchdringen der Probe (z.B. an den Schnittfugenwänden, in der entstehenden Schmelze, im sich bildenden Plasma) führt zu einer zusätzlichen Abnahme der Strahlungsleistung und ist Ursache dafür, dass nahezu parallele Schnittkanten bei Fokusslagen von ca. 0,4 mm im Werkstück (bei einem in Strahlungsrichtung positiven Gradienten des Intensitätsprofils innerhalb der Probendicke) erreicht werden.

Diese Beobachtungen werden auch für Wellenlängen von 532 nm und 1064 nm an Silizium bestätigt. Bei einer Brennweite der Bearbeitungsoptik von 34 mm ergab sich für 532 nm eine optimale Fokusslage bei 0,3 mm unterhalb der Waferoberfläche. Bei dieser konnten nahezu senkrechte, parallele Schnittflächen erzielt werden. Da für 1064 nm gemäß Literaturhinweisen bei gleicher Brennweite eine optimale Fokusslage unterhalb der Waferunterseite zu erwarten ist, kann eine Tendenz zu geringeren Defokussierungen in Bezug auf die Waferoberfläche mit einer Änderung von langwelliger zu kurzwelliger Laserstrahlung abgeleitet werden. Als Grund dafür ist hier eine unterschiedliche optische Eindringtiefe in das Material bei

verschiedenen Wellenlängen zu sehen. Die Brennweite bestimmt dabei über die Rayleighlänge hauptsächlich den Toleranzbereich für die optimale Fokusslage.[3,8,28]

Aus den erhaltenen Untersuchungsergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass eine optimale Fokusslage in Bezug auf eine maximale Prozessgeschwindigkeit (ca. 0,23 mm/s) ca. 0,15 mm im Materialinneren liegt. In Hinblick auf parallele Schnittflächen sowie geringe Schnittfugenbreiten am Strahlein- und am Strahlaustritt ergab sich jedoch eine optimale Fokusslage bei ca. 0,40 mm unterhalb der Waferoberfläche (bei einem 200 µm Wafer also 0,20 mm unterhalb der Waferunterseite).

2.6 Scantechnologie (Scangeschwindigkeit)

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Überfahrgeschwindigkeit des Laserstrahls auf das Bearbeitungsergebnis untersucht werden. Dabei sei im Vorhinein darauf hingewiesen, dass sich die beiden Möglichkeiten zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück (Scanner, Linearantriebe der Achsen des Proben­tisches) - wie unter Punkt 2.1.2 beschrieben - maßgeblich durch die jeweiligen Geschwindigkeitsbereiche unterscheiden.

Aussagen der Fachliteratur ist zu entnehmen, dass Bearbeitungsergebnisse unterschiedlich ausfallen, abhängig davon, ob mit hohen oder niedrigen Geschwindigkeiten geschnitten wird. Folgende Zusammenhänge sind vom Laserstrahlbrennschneiden bzw. -schmelz-schneiden von Stahlblech bekannt:

Die Schneidgeschwindigkeit ist eine Funktion der Pulsfolgefrequenz und des maximalen Puls-zu-Puls-Vorschubes. Sie erreicht ihren maximal möglichen Wert, wenn der relative Vorschub zwischen zwei Pulsen der halben Schnittfugenbreite entspricht, d.h. wenn eine Pulsüberlappung von 50 % vorliegt.

Mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit nimmt die Schnittspaltweite ab; große Schnittfugenbreiten liegen also bei niedrigen Schneidgeschwindigkeiten, schmale Schnittfugen bei hohen Geschwindigkeiten vor. Für größere Geschwindigkeiten stellt sich eine Schneidgeschwindigkeits-unabhängige schmalste Schnittspaltweite ein, die jedoch nicht die Größenordnung des Fokussdurchmessers erreicht. Dabei nehmen die Schnittfugenbreiten an der Werkstückunterseite (Strahlaustritt) verglichen mit den Schnittfugenbreiten an der Werkstückoberseite (Strahleintritt) geringere Werte an, so dass eine in Richtung der Werkstückunterseite leicht verjüngte Schnittfuge entsteht.

Bei größeren Vorschubgeschwindigkeiten kann es auf der Strahleintrittsseite verstärkt zum Materialauswurf kommen.[2,3,11,26,28]

In folgendem soll untersucht werden, inwieweit diese Thesen auf die Bearbeitung von Silizium bei unterschiedlichen Scan- bzw. Verfahrensgeschwindigkeiten zutreffend sind.

2.6.1 Scanner

Zur Untersuchung der Schneidgeschwindigkeitsabhängigkeit war es zunächst erforderlich einen geeigneten Wertebereich für die Geschwindigkeit festzulegen. Als geräteabhängige Randbedingung beim Schneiden mit Scanner ist die minimale Geschwindigkeit vorgegeben. Beim eingesetzten Gerät der Fa. Arges darf die maximale Zeitdauer je Kantenlänge 175 s betragen. Da mit der Seitenlänge der quadratischen Kontur von 4 mm die minimal mögliche Strahlablenggeschwindigkeit ca. 0,024 mm/s beträgt, wurde (bei Zugabe einer Toleranz) eine minimale Scangeschwindigkeit von 0,1 mm/s gewählt. Da sich die maximal sinnvolle Scangeschwindigkeit aus der Überlegung, dass die aufeinander folgenden Pulse mit einem zeitlichen Abstand von 0,1 ms und einem praktischen Durchmesser von ca. 20 μm gerade noch nebeneinander liegen sollten, zu 200 mm/s ergab, wurde bis 300 mm/s gemessen (*Anhang A.8*).

Folgende weitere Verfahrensparameter waren konstant: Laserparameter ($P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert), Fokussierung ($f = 100 \text{ mm}$; Fokusslage: $\pm 0 \text{ mm}$; Werkstückoberseite). Als Probenmaterial diente $\langle 111 \rangle$ -Silizium mit einer Materialdicke von $(210 \pm 10) \mu\text{m}$, das an Luft mit Scanner geschnitten wurde.

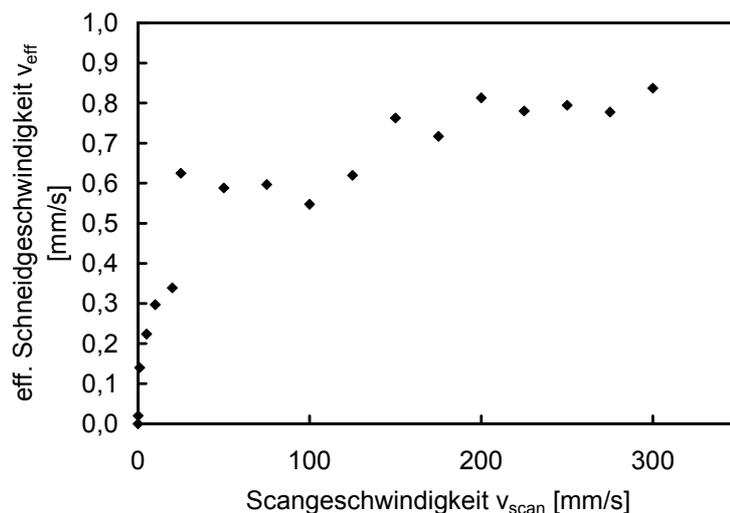


Abbildung 2.51: effektive Schneidgeschwindigkeit mit Scanneroptik

Wie in *Abbildung 2.51* ersichtlich, steigt die effektive Schneidgeschwindigkeit mit der Scangeschwindigkeit für kleine Werte (bis ca. 50 mm/s) stark und für größere ($> 50 \text{ mm/s}$) lang-

samer aber kontinuierlich an. Dabei liegt die Scangeschwindigkeit im Vergleich zur eigentlichen Prozessgeschwindigkeit um drei Größenordnungen höher. Ein Maximum der effektiven Schneidgeschwindigkeit für 50 %-ige Pulsüberdeckung etwa bei einer Scangeschwindigkeit von 120 mm/s ist entgegen der Erwartung nicht festgestellt worden.

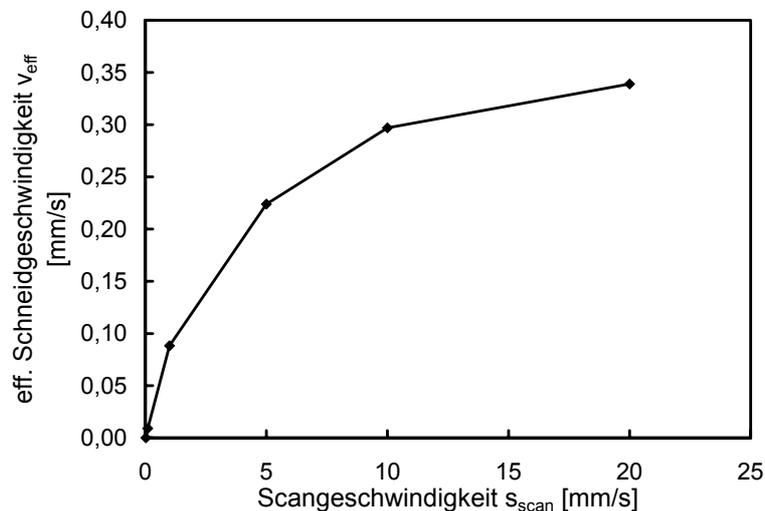


Abbildung 2.52: effektive Schneidgeschwindigkeit in engerem Geschwindigkeitsfenster; $v_{scan} = (0,1-20)$ mm/s

Dagegen wurde eine maximale effektive Schneidgeschwindigkeit (ca. 0,84 mm/s) für eine maximale Scangeschwindigkeit bei 300 mm/s gemessen. Die für niedrigere Scangeschwindigkeiten ermittelten Schneidgeschwindigkeiten unterliegen einer geringeren Schwankungsbreite, wie an der Zunahme der Fehlergrößen in *Anhang A.8* und der Messung der effektiven Schneidgeschwindigkeit in einem engeren Geschwindigkeitsfenster, dargestellt in *Anhang A.9* und *Abbildung 2.52*, ersichtlich.

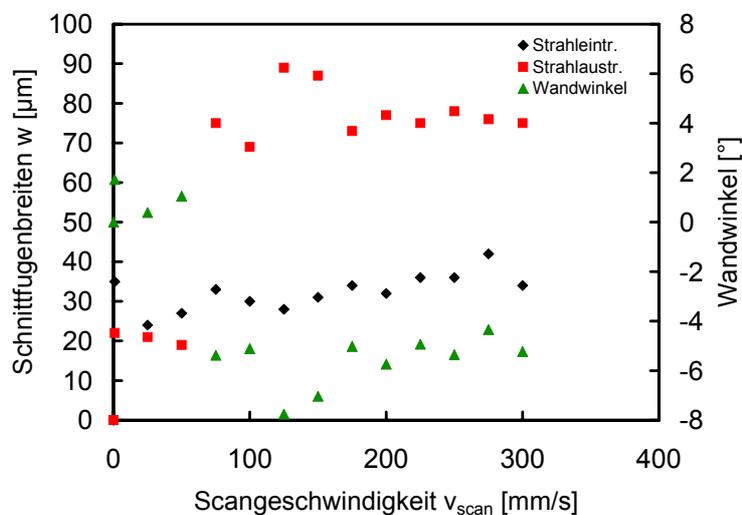


Abbildung 2.53: Schnittfugenbreite und Wandwinkel

Aufgrund unterschiedlicher Scangeschwindigkeiten war auch eine stark unterschiedliche Anzahl Überfahrten notwendig. Um einen aussagefähigen Durchschnitt zu erzielen, wurden deshalb zu den errechneten Mittelwerten noch jeweils 50 Sicherheitsüberfahrten zugegeben, um vergleichbare Bedingungen zur Beurteilung der Schnittqualität zu erhalten.

Entgegen der Erwartung stellte sich heraus, dass beim Schneiden von Silizium die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt (ca. 32 μm) mit steigender Scangeschwindigkeit schwach zunehmen (*Abbildungen 2.53 und 2.54*). Am Strahlaustritt kommt es ab einer Scangeschwindigkeit um 75 mm/s zu einer einseitigen Schnittfugenverbreiterung von ca. 20 μm auf im Mittel 77 μm , welche sich über ca. 2/3 der Schnittlänge erstreckt und mit einer Umkehr zu negativen Flankenwinkeln (ca. $-5,6^\circ$) einen Wechsel der Fugengeometrie von positiver zu negativer Konizität bewirkt (*Abbildungen 2.53 und 2.55*).

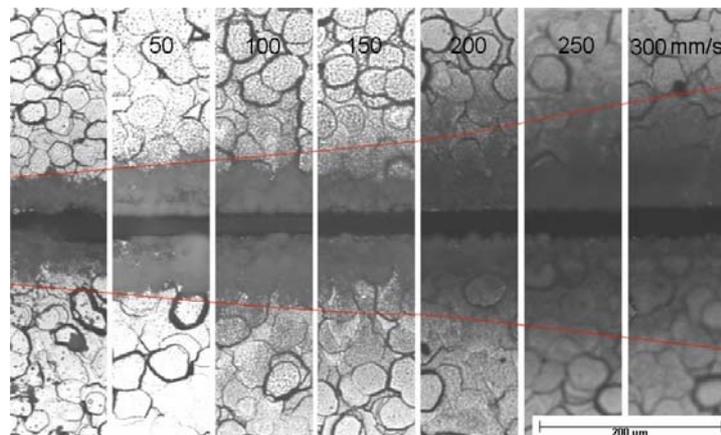


Abbildung 2.54: Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

Die stark oxidierten Schmelzeablagerungen am Strahleintritt (*Abbildung 2.54*) nehmen zunächst mit steigender Scangeschwindigkeit bis ca. 100 mm/s in ihrer Ausdehnung (ca. 170 μm) zu. Mit größeren Geschwindigkeiten nehmen diese grobkörnigen Oxide (ca. 150 μm) um die Schnittfuge wieder ab. Dafür kommt es zur vermehrten Formierung von feinkörnigem Siliziumstaub, der infolge seiner weiteren Verbreitung um die Bearbeitungszone zu einer größeren Ablagerungsausdehnung (ca. 260 μm) führt. Somit wurde auch hier die Korrespondenz zwischen Schnittfugenbreite und Ausdehnung bzw. Menge und Art der Ablagerungen festgestellt.

Dies zeigt sich besonders deutlich am Strahlaustritt: Mit sprunghaftem Anstieg der Schnittfugenbreite ist auch ein Sprung in der entstandenen Ablagerungsmenge von ca. 180 μm auf im Mittel 360 μm (*Abbildung 2.55*) zu verzeichnen. Große Schwankungen beruhen auf mögli-

chen Prozessunsicherheiten sowie einem relativ hohen subjektiven Fehler bei der optischen Vermessung der Ausdehnungen.

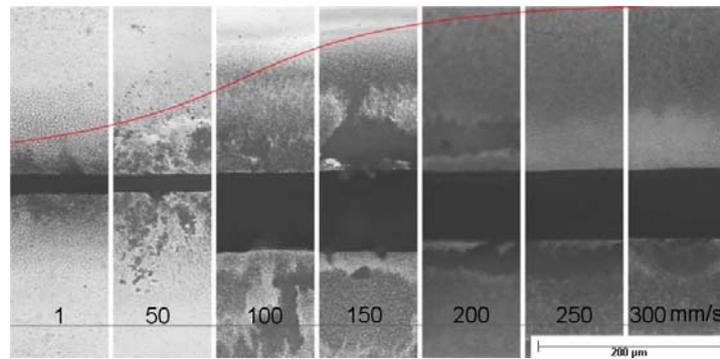


Abbildung 2.55: Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Scangeschwindigkeit

2.6.2 Festoptik (Tisch)

Das Schneiden mit fest stehendem Laserstrahl und bewegtem Probenstisch basierte auf folgenden Parametern. Die maximale Verfahrensgeschwindigkeit betrug ca. 8,3 mm/s. Die minimal verwendete Schneidgeschwindigkeit ergab sich während des Versuchs, als keine signifikante Änderung der zum Ausschneiden notwendigen Überfahrten mit abnehmender Verfahrensgeschwindigkeit mehr erreicht werden konnte.

Bei der Arbeit mit der Festoptik galten die gleichen Verfahrensparameter, welche schon beim Schneiden mit Scanneroptik (Punkt 2.6.1) relevant waren (*Anhang A.10*).

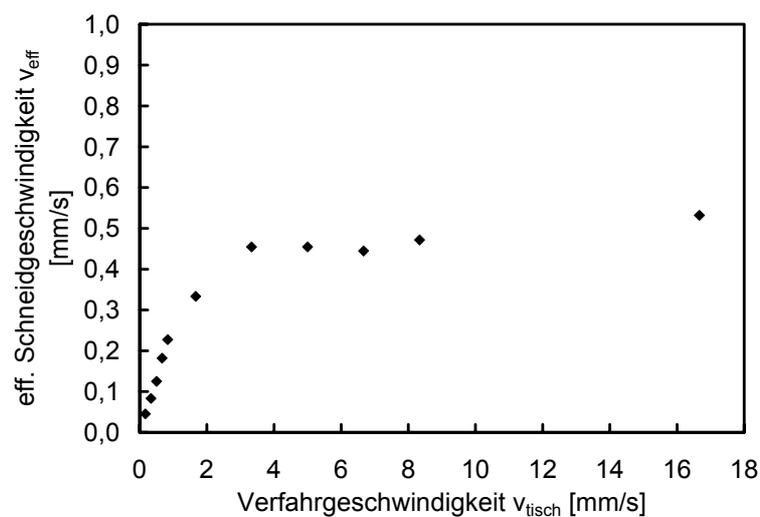


Abbildung 2.56: effektive Schneidgeschwindigkeit

Für die effektive Schneidgeschwindigkeit ergibt sich ein ähnlicher Zusammenhang wie beim Schneiden mit Scanneroptik: Für niedrige Verfahrensgeschwindigkeiten ($< 4 \text{ mm/s}$) steigt die effektive Schneidgeschwindigkeit stark mit wachsender Verfahrensgeschwindigkeit und nähert sich bei höheren Geschwindigkeiten einem Grenzwert von ca. $0,6 \text{ mm/s}$. (Abbildung 2.56). Damit erfolgt der Übergang vom stark veränderlichen zum weniger stark veränderlichen Geschwindigkeitsbereich abhängig vom Tischvorschub schon etwas früher (bei ca. 4 mm/s) als beim Schneiden mit Scanner (bei ca. 10 mm/s). Die Messwerte weisen eine geringere Varianz auf.

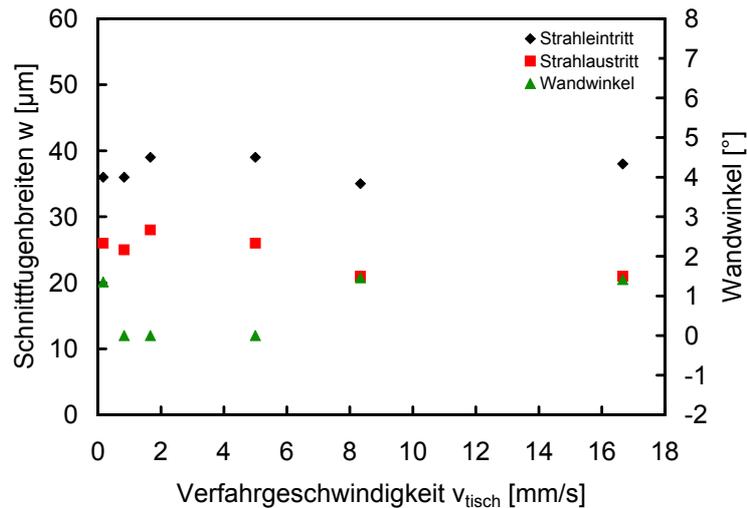


Abbildung 2.57: Schnittfugenbreite und Wandwinkel

Wie es besser anhand der *Abbildungen 2.58 und 2.59* als im Diagramm (*Abbildung 2.57*) ersichtlich wird, nehmen die Schnittfugenbreiten auf der Strahleintrittsseite (ca. $31 \mu\text{m}$) und am Strahlaustritt (ca. $25 \mu\text{m}$) zunächst schwach zu (bis zu Geschwindigkeiten von ca. 2 mm/s) und für größere Geschwindigkeiten geringfügig ab. Die Flankenwinkel sind mit maximal $2,3^\circ$ verhältnismäßig gering; mit ca. $1,4^\circ$ Wandneigung sind nahezu parallele Schnittflächen für geringste Verfahrensgeschwindigkeiten (bis ca. 5 mm/s) erzielt worden.

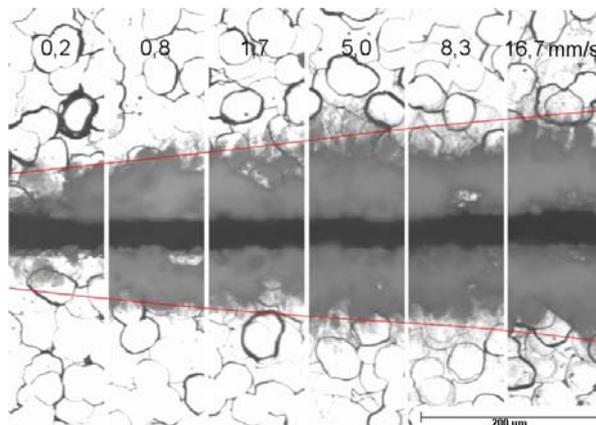


Abbildung 2.58: Schnittfugen am Strahleintritt in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

Die Ablagerungen nehmen auf der Strahleintrittsseite in Form des stark oxidierten Schmelzaufwurfs von ca. 190 μm auf ca. 270 μm mit der Verfahrensgeschwindigkeit zu. Dies gilt auch für die Strahlaustrittsseite (ca. 160 μm bis ca. 190 μm), an welcher dann eher feine Siliziumpartikel vorzufinden sind (*Abbildungen 2.58 und 2.59*).

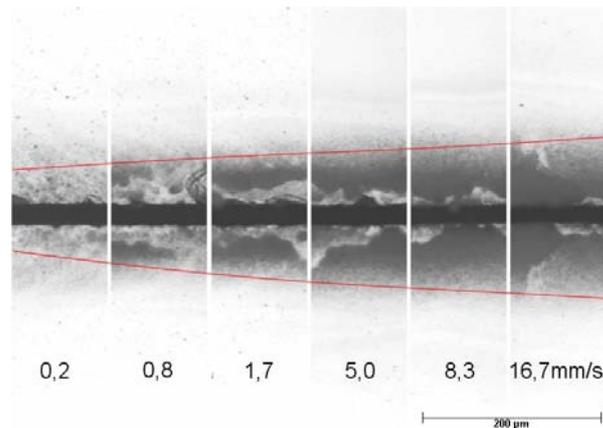


Abbildung 2.59: Schnittfugen am Strahlaustritt in Abhängigkeit von der Verfahrensgeschwindigkeit

2.6.3 Zusammenfassung

Zur Begründung der erzielten Effekte existieren verschiedene Denkansätze:

Bei geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen Laserstrahl und Werkstück, führt die Zunahme der lateralen Pulsüberlappung zu einer höheren eingebrachten Streckenenergie. Dadurch kommt es zu einem stärkeren Aufheizen auch im Randbereich des Laserstrahls liegender Werkstückbereiche und damit zu einem schnelleren Aufschmelzen bzw. Verdampfen. Die Folge ist ein Anstieg des pro Lage abgetragenen Volumens das zu einer Verringerung der erforderlichen Anzahl Überfahrten führt. Dennoch nimmt die Prozessgeschwindigkeit dadurch nicht zu, sondern eher ab. Die Erklärung hierfür wird in der stärker geneigten Oberfläche (Schneidfront) in der Bearbeitungszone gesehen. Auf diese trifft der Laserstrahl bei Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit auf. Eine teilweise Rekondensation des in der Regel

senkrecht von der Bearbeitungsoberfläche abströmenden Materialdampfes an der Gesenkwand führt letztendlich zu einem Sinken der tatsächlichen Abtragsrate. Reduziert man hingegen den lateralen Pulsüberdeckungsgrad durch Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit, wird aufgrund einer weniger starken Neigung der Abtragsfront ein nahezu vollständiger Materialaustrieb aus der Schnittfuge und damit ein besserer Verfahrenswirkungsgrad sowie eine maximale Prozessgeschwindigkeit gewährleistet.

Breitere Schnittfugen entstehen bei niedrigeren Schneidgeschwindigkeiten durch eine stärkere Erwärmung des Werkstoffs in einem größeren Bereich um den Laserstrahl infolge endlicher Wärmeleitung. Höhere Verfahrensgeschwindigkeiten bewirken eine zunehmende Verkleinerung dieses Bereichs und schmalere Schnittspalte, welche bei sehr hohen Geschwindigkeiten in etwa dem Durchmesser des fokussierten Laserstrahls entsprechen können.[3,11,28]

Für die einseitige Schnittfugenverbreiterung am Strahlaustritt gibt es noch keine allgemeingültige Erklärung. Beim Laserstrahlmikrobohren in Silizium sind in umgekehrter Weise bei geringen Geschwindigkeiten negative Konizitäten aufgetreten, die sich bei deren Erhöhung in positive Konizität umgewandelt haben. Eine Möglichkeit zur Erklärung der einseitig verbreiterten Schnittfuge kann die Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten vom Einfallswinkel der Strahlung sein. Aufgrund einer eventuell unzureichenden Strahllagestabilität vor allem bei höheren Scangeschwindigkeiten, besteht die Möglichkeit, dass ein veränderter Energieeintrag in das spröde Material Silizium zu größeren Temperaturgradienten und damit zur Rissbildung und zum Abplatzen größerer Siliziumteilchen führen kann.[2,26]

Bei Verwendung hoher Scangeschwindigkeiten sind reproduzierbare Ergebnisse schwieriger zu erreichen. Die Ursache dafür liegt in einem höheren Einfluss von Prozessschwankungen, wie etwa Pulsleistungsschwankungen bei geringerer Pulsüberlappung.

In Bezug auf die entstandenen Ablagerungen ergaben sich beim Schneiden mit Scanneroptik ähnliche Ergebnisse wie in der Dissertation „Nd:YAG-Laserstrukturierung in der Silizium-Mikromechanik“ von Stefan Dauer dargelegt.[8]

Es zeigte sich ebenfalls eine Abhängigkeit der Gestalt der Ablagerungen von der Vorschubgeschwindigkeit in dem Sinne, dass die Korngröße sowie Porosität der Ablagerungen mit steigendem Vorschub abnimmt. Dadurch bedingt, nimmt die Ablagerungsausdehnung bei mittleren Scangeschwindigkeiten (ca. 150 mm/s) zunächst leicht ab, steigt dann aber mit zunehmender Neigung des abgetragenen Materials zu feineren Partikeln und damit einem zunehmenden Austreten der Schmelze aus der Schnittfuge wieder stärker an. Weiterhin korrespondiert auch hier die Menge an abgetragenen Material, d.h. die Menge an nichtflüchtigen Reaktionsprodukten, in etwa mit der Geometrie der Schnittfuge (Schnittfugenbreite). Die Ablagerungserscheinungen sind wie folgt Geschwindigkeitsbereichen zuzuordnen:

- Das Herausragen eines Teils der Schmelze infolge deren starker Entstehung sowie explosionsartiges Verdampfen verbunden mit Aufkommen und Zerplatzen von Dampfblasen bei der relativ langen Laserstrahlungseinwirkungsdauer infolge geringer Relativgeschwindigkeiten (1 - 50 mm/s; eff. Schneidgeschwindigkeit: 0,03 - 0,58 mm/s),
- ein schlechterer Schmelzaustrieb aus der Schnittfuge und eine geringere Porosität nach der Erstarrung aufgrund eines geringeren Schmelzanteils, einem geringeren Verdampfungsanteils und damit einem niedrigeren entstehenden Dampfdruck aufgrund einer geringeren eingebrachten Strahlungsleistung pro gescannter Strecke in das Material bei mittleren Relativgeschwindigkeiten (100 - 150 mm/s; eff. Schneidgeschwindigkeit: 0,55 - 0,76 mm/s),
- das sehr feine Zerstäuben der Schmelze und Niederschlagen in einem ausgedehnteren Bereich aufgrund eines ausreichend hohen Dampfdrucks in Bezug auf eine geringere Gesamtmenge an Schmelze infolge kleinerer Abtragstiefen aber gleichbleibenden Abkühlgeschwindigkeiten und höheren Relativgeschwindigkeiten (200 m/s - 300 mm/s; eff. Schneidgeschwindigkeit: 0,81 mm/s - 0,84 mm/s). [8]

Zu kleineren Relativgeschwindigkeiten hin (in der Größenordnung des Verfahrensbereiches der Tischsteuerung; < 17 mm/s), nimmt jedoch der oxidierte Schmelzaufwurf wiederum ab, da nun die eingebrachte Laserleistung aufgrund einer sehr hohen Pulsüberlappung zu einem nahezu vollständigen Verdampfen des Fugenmaterials führt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Schneidergebnisse sowohl für Scanner- als auch für Tischsteuerung zu prinzipiell gleichen Zusammenhängen führen. Diese gelten allerdings in unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen.

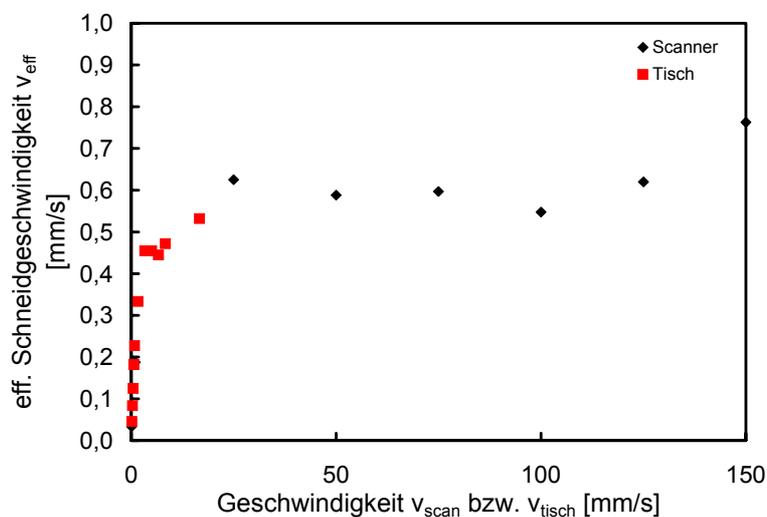


Abbildung 2.60: effektive Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit für Scanner- und Tischsteuerung

Ihren gerätespezifischen Möglichkeiten entsprechend ist es für große erforderliche Relativgeschwindigkeiten (> 16 mm/s) günstiger mit Scanneroptik, für kleinere bzw. sehr kleine Relativgeschwindigkeiten ($< 0,25$ mm/s; konturabhängig) günstiger bzw. unumgänglich, mit Tischsteuerung zu schneiden (*Abbildung 2.60*).

Eine maximale Prozessgeschwindigkeit von ca. 0,80 mm/s hat sich beim Schneiden mit Scanner für eine Scangeschwindigkeit von 300 mm/s ergeben. Dagegen sind minimale Schnittfugenbreiten am Strahlein- und Strahlaustritt sowie kleine Wandwinkel bei niedrigen Relativgeschwindigkeiten bis ca. 50 mm/s erzielt worden.

2.7 Einfluss der Gasatmosphäre

Die Betrachtungen zu Einflüssen der Gasatmosphäre auf das Schneidergebnis beim Laserstrahlschneiden von Silizium stützen sich u.a. auf die im Rahmen einer Praktikumsarbeit [9] erfolgten Voruntersuchungen.

Relevant im Hinblick auf die Prozessgeschwindigkeit war eine Verringerung der notwendigen Anzahl Überfahrten bzw. eine Steigerung der effektiven Prozessgeschwindigkeit durch die Verwendung von Inertgasen (Stickstoff, Argon). Am stärksten traten Geschwindigkeitsvorteile bei Verwendung von Helium im Gegensatz zum Schneiden an Luft auf. Diese Ergebnisse wurden mit einer erhöhten Energieeinkopplung durch eine Reduzierung des Plasmas aufgrund unterschiedlicher Ionisierungsenergien der Gase in Zusammenhang gebracht.

In Hinblick auf die Schnittqualität sind neben einer Tendenz zu geringeren Schnittfugenbreiten auf Strahleintritts- als auch auf Strahlaustrittsseite mit Verwendung von Prozessgasen wie Argon und Helium auch geringere Ausbrüche festzustellen. Dies ist möglich aufgrund einer besseren Kühlung durch das Gas und damit einer geringeren thermischen Belastung der Probe im Gegensatz zum Schneiden an Luft. Dieser Effekt ist mit den jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten der Gase in Verbindung zu bringen (*Tabelle 2.5*).

Zur genaueren Untersuchung wurde eine Vakuumkammer verwendet, um eine definierte Umgebungssituation zu schaffen.

Tabelle 2.5: Übersicht zu Ionisierungsenergie und Wärmeleitfähigkeit eingesetzter Gase [9]

Gasart	Ionisierungsenergie [eV]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Sauerstoff (O_2)	13,62	0,026
Stickstoff (N_2)	14,53	0,026
Argon (Ar)	15,62	0,017

Helium (He)	24,59	0,150
-------------	-------	-------

Zunächst ist für die Probenaufgabe in der Kammer der Fokus mit Hilfe eines Suchprogramms bestimmt worden. Dieser wurde für alle Gase näherungsweise als gleich angenommen, da eine Fokusänderung wegen kleiner Brechzahländerung im gasförmigen Medium und wegen der großen Fokusslänge des Bearbeitungsobjektivs mit einer Brennweite von $f = 100$ mm vernachlässigbar ist. Der Austausch der Atmosphäre erfolgte über Druckwechselspülung. Dabei wurde die Kammer abwechselnd bis auf ca. 0,08 mbar evakuiert und anschließend mit dem jeweiligen Gas gespült. Nach dreimaligem Spülen wurde die Kammer mit leichtem Überdruck (nahe Atmosphärendruck) mit dem Gas befüllt. Bei den Schneidversuchen im Vakuum wurde ein Kammerdruck unter ca. 0,08 mbar durch ständiges Abpumpen mittels Vorvakuumpumpe eingestellt.

Die Bearbeitung der ca. 210 μm dicken Siliziumproben erfolgte durch das Quarzglasfenster hindurch mit einer eingestellten Laserleistung P von 3 W bei einer Pulswiederholrate f_{Rep} von 10 kHz sowie einer Scangeschwindigkeit von 50 mm/s unter ansonsten gleichen Fokussierungsbedingungen ($f = 100$ mm; Fokusslage: ± 0 mm; Werkstückoberseite) wie der unter Punkt 2.2 beschriebenen Methode.

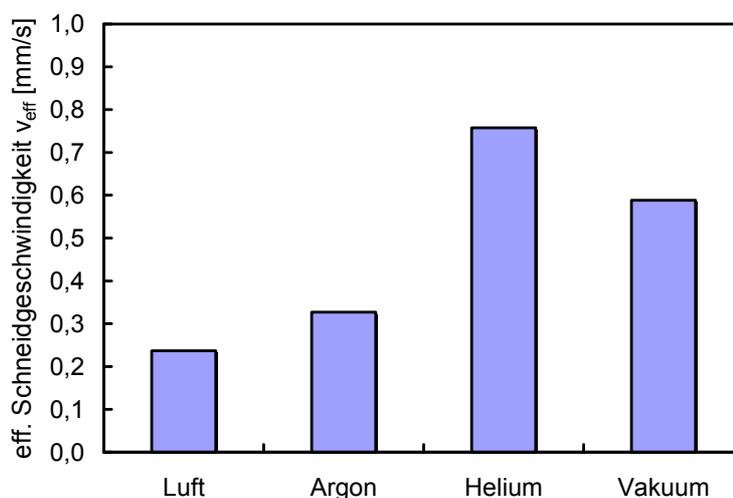


Abbildung 2.61: effektive Schneidgeschwindigkeit

Wie aus *Anhang A.11* hervorgeht, besteht ein starker Einfluss des umgebenden Atmosphärgases auf die Schneidgeschwindigkeit sowie die Schnittqualität beim Schneiden von Silizium mit Laserstrahlung. Maximale effektive Schneidgeschwindigkeiten wurden für eine Bearbeitung in Helium, dicht gefolgt von der Prozessgeschwindigkeit in Feinvakuumatmosphäre, festgestellt (*Abbildung 2.61*).

In Bezug auf die Schnittqualität (kleinste Schnittfugenbreite, geringe Ablagerungsausdehnung, kleine Flankenwinkel) sind mit Helium beste Ergebnisse erzielt worden (*Abbildung 2.62*).

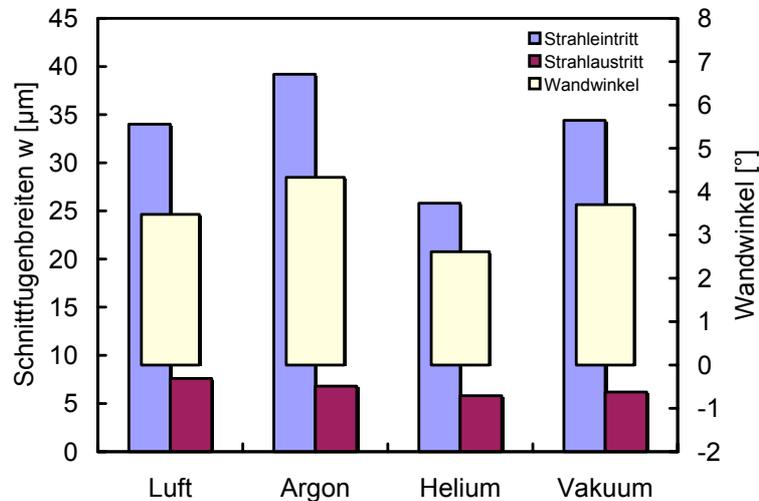


Abbildung 2.62: Schnittfugenbreiten und Wandwinkel

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind zum Teil bereits anlässlich der Photonics West veröffentlicht wurden (*Anhang F*). Sie wurden weiterhin im Rahmen dieser Diplomarbeit durch neue Erkenntnisse basierend auf einer Analyse im Rasterelektronenmikroskop (REM) ergänzt. Auf die Ergebnisse für die einzelnen Gasatmosphären wird im nächsten Abschnitt konkret eingegangen.

2.7.1 Luft

Die Ergebnisse des Schneidens von Silizium an Luft dienen als Referenz; Sie liefern Bezugsgrößen zur Beurteilung von Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität für die Bearbeitungsergebnisse in verschiedenen Atmosphären.

Dabei war zum Schneiden die im Vergleich höchste Anzahl an Überfahrten erforderlich, weshalb sich eine niedrigste effektive Schneidgeschwindigkeit von 0,24 mm/s an Luft ergab (vgl. *Abbildung 2.61*). Eine Erhöhung der Abtragate und damit der Schneidgeschwindigkeit durch die Anwesenheit von Sauerstoff wie es beim Laserstrahlschneiden der Fall ist, wurde für Silizium nicht festgestellt.

Mit etwa 34 μm am Strahleintritt und ca. 8 μm am Strahlaustritt fallen die erzeugten Schnittfugen relativ schmal aus. Die hohe Varianz der gemessenen Werte lässt auf eine höhere Unregelmäßigkeit der Schnittkanten schließen. Diese bedingen auch die stark oxidierten aufgeworfenen Schmelzeablagerungen, welche die Schnittfuge zusetzen, zum Teil sogar wieder

verschließen sowie in Form unscharfer grobkörniger Partikel die eigentlichen Schnittkanten überdecken. Die chemische Reaktion zwischen Werkstück und Schneidgas (Oxidation) führt bei Betrachtung im Stereomikroskop zu einer hellen Farbe (weiß, transparent) der Ablagerungen (*Abbildungen 2.63 und 2.64*).

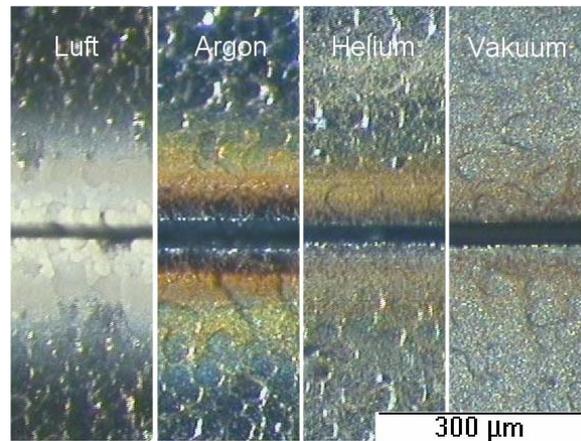


Abbildung 2.63: Ablagerungen am Strahleintritt für die verschiedenen Prozessgase

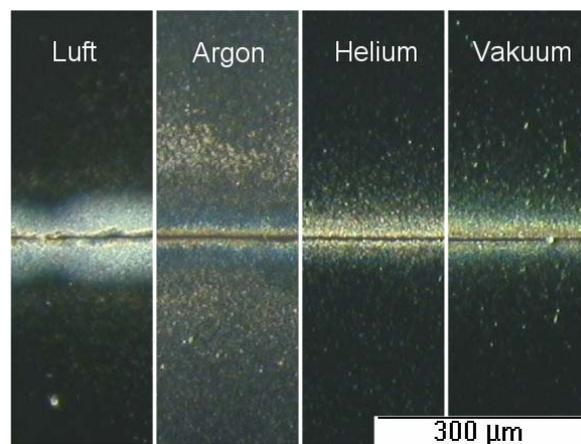


Abbildung 2.64: Ablagerungen am Strahlaustritt für die verschiedenen Prozessgase

Die beschriebenen losen Ablagerungen mit einer Ausdehnung von ca. 180 µm sind vorwiegend lokal auf den Bereich der Schnittfuge begrenzt sind. Im Gegensatz dazu sind die Ablagerungen auf der Strahlaustrittsseite weniger stark ausgeprägt und liegen eher in Form feinkörnigerer Partikel vor. Auch in größerer Entfernung zur Schnittfuge sind noch vereinzelt kugelförmig erstarrte Schmelzperlen aufgetreten.

Die stark oxidierten Schmelzpartikel (wahrscheinlich SiO_2) auf den Schnittkanten wurden im Rasterelektronenmikroskop (REM) analysiert. Die Darstellung der Analyseergebnisse erfolgt mit den *Abbildungen 2.65* (SE-Bild) und *2.66* (EDX-Analyse). Insgesamt wurde festgestellt,

dass beim Schneiden an Luft ein sehr breiter oxidierter Streifen entsteht. Eine Linienanalyse (linescan) ergab, dass sich dieser stärker oxidierte Streifen ausgehend von der Schnittkante bis über 260 μm auf der Probenfläche erstreckt (*Anhang C.13*). Wie anhand der Oberflächenmorphologie sichtbar, liegen diese Ablagerungen in Form einer oberflächlichen, lockeren, aber dicken Oxidschicht vor.

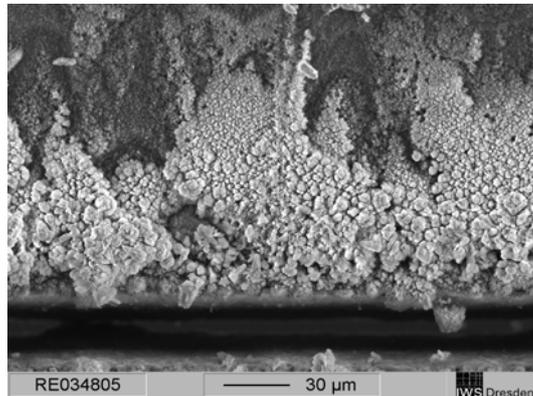


Abbildung 2.65: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Luft

Eine qualitative EDX-Analyse der Ablagerungen zeigt einen hohen Sauerstoff-Peak. Bei einem Wandwinkel von $3,5^\circ$ ist die Geometrie der Schnittfuge leicht konisch.

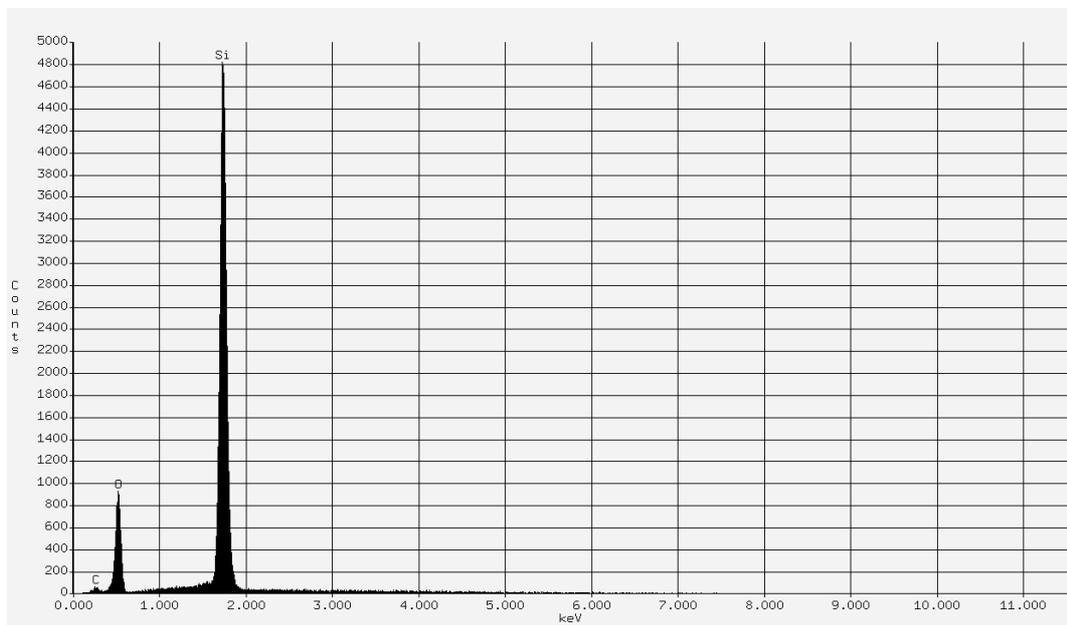


Abbildung 2.66: Quantitative EDX-Analyse der Schmelzablagerungen (Strahleintritt) für Luft

2.7.2 Argon

Mit einer effektiver Schneidgeschwindigkeit von 0,33 mm/s wurde beim Schneiden mit Argon eine Steigerung von 25 % gegenüber Luft erreicht. Dabei tritt mit einer Breite von 39 μm bei der Verwendung von Argon als Prozessgas die breiteste Schnittfuge am Strahleintritt auf. Die Schnittfugenbreite am Strahlaustritt ist mit ca. 7 μm hingegen etwas geringer als beim Schneiden an Luft. Folglich ergibt sich ein relativ großer Flankenwinkel von $4,3^\circ$. Eine geringe Varianz erzielter Messwerte deutet zudem auf regelmäßige Schnittkanten hin. Ursache für die relativ scharfen Schnittkanten gegenüber der beim Schneiden an Luft ist unter anderem die stärkere Formierung des abgetragenen Materials in Form von feinem Siliziumstaub. Mittels Mikroskop ist dieser als ein dünner bräunlicher Staubfilm zu erkennen (*Abbildungen 2.63 und 2.64*). Dieser nimmt mit über 350 μm Ausdehnung eine größere Fläche (*Abbildung 2.67*) ein und führt damit zu einer stärkeren Kontamination auch von der Bearbeitungszone weiter entfernter Gebiete. Ursache für die größere Ausdehnung dieses Prozessdebris ist neben der größeren Menge an abgetragenen Material die Formierung in feinen losen Partikeln, welche aufgrund ihres geringeren Gewichts verstärkt auch in weiter entfernte Bereiche getragen werden. Die Dichte des Siliziumstaubes nimmt mit der Entfernung von der Schnittfuge kontinuierlich ab. Charakterisiert nach der mittleren Partikelgröße lassen sich drei Ablagerungszonen unterscheiden:

1. feiner Siliziumstaub direkt um die Schnittfuge,
2. feine Siliziumpartikel,
3. größere Partikel.

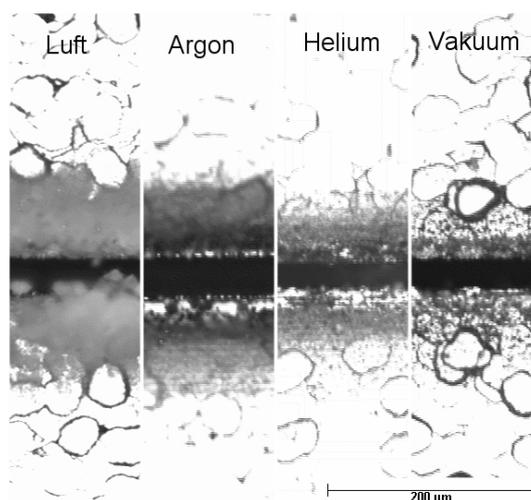


Abbildung 2.67: Schnittfugen (Strahleintritt) für die verschiedenen Prozessgase

Ausgehend von der Schnittfuge gehen diese ineinander über (*Abbildung 2.68*).

Trotz des Ziels der Vermeidung von Oxidationsvorgängen durch die Verwendung von Inertgasen konnte eine Oxidation des Siliziums in der vorhandenen Argonatmosphäre nicht vollständig verhindert werden.

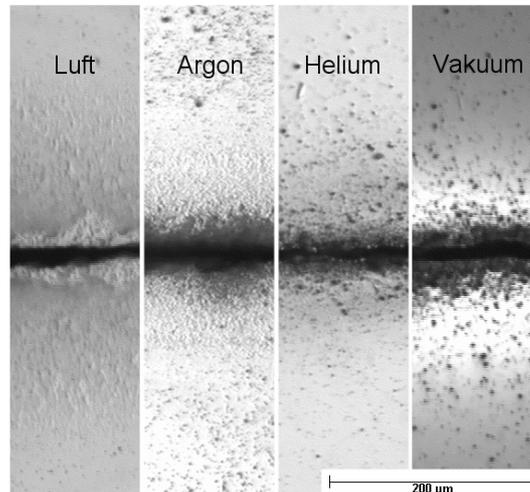


Abbildung 2.68: Schnittfugen (Strahlaustritt) für verschiedene Prozessgase

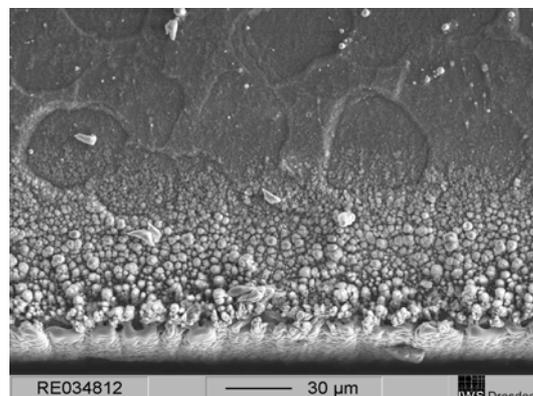


Abbildung 2.69: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Argon

Das SE-Bild im Rasterelektronenmikroskop (*Abbildung 2.69*) zeigt einen wesentlich schmaleren Oxidstreifen sowie die EDX-Analyse (*Abbildung 2.70*) einen wesentlich kleineren Sauerstoff-Peak als für die an Luft bearbeiteten Proben, was auf weniger ausgeprägte Oxidation schließen lässt. Wie sich anhand des Profils der Linienanalyse (*Anhang C.23*) ableiten lässt, liegt hier eine ausgedehnte, im Vergleich zur Luftumgebung wesentlich dünnere Oxidschicht auf der Waferoberfläche vor.

Bereits ab einem Abstand von ca. 190 μm von der Schnittkante ändert sich diese nicht wesentlich. In einem schmalen Streifen (ca. 20 μm) direkt auf der Schnittkante wurde ein sprunghafter Abfall der Sauerstoffkonzentration festgestellt.

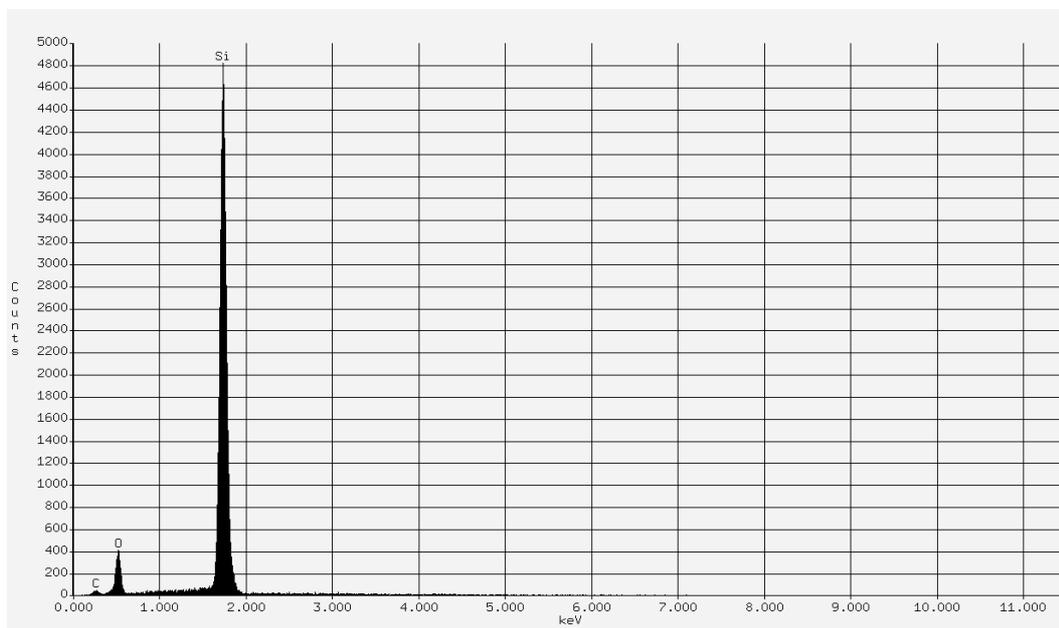


Abbildung 2.70: Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Argon

Es ist ein Indiz dafür, dass dieser Bereich mit relativ glatten Strukturen von erstarrter Schmelze, durch Plasmaeinwirkung entstanden ist.

Einerseits führt dies zu einem stärkeren Schmelzaustrieb, in geringerem Maß zur Verbrennung von Schmelzanteilen und damit zur nachweislichen Existenz von nur wenigen flüchtigen Reaktionsprodukten, d.h. geringen SiO_2 -Anteilen. Zum anderen resultiert daraus die Entstehung einer breiteren Schnittfuge am Strahleintritt verbunden mit einer deutlichen Zunahme der Ablagerungsmenge auf der Waferoberfläche.

2.7.3 Helium

Unter Verwendung von Helium wurde die höchste effektive Schneidgeschwindigkeit erzielt; Sie macht mit 0,76 mm/s eine Steigerung von ca. 65 % gegenüber der in Luft erreichten aus. Weiterhin zeichnen sich die Schnittfugen durch die geringste erreichte Breite von 26 μm am Strahleintritt sowie ca. 6 μm am Strahlaustritt aus.

Mit einem daraus resultierenden kleinsten Wandwinkel von $2,6^\circ$ besitzen die Schnittflächen die stärkste Neigung zur Parallelität. Die erzielten Schnittkanten sind sehr scharf. Die Ablagerungen liegen als ein sehr dünner Staubfilm auf einen, im Vergleich zu Argon engeren Be-

reich beschränkt vor (Ausdehnung: ca. 210 μm). Die geringere Dichte und Ausdehnung der Ablagerungen lassen unter anderem auf eine geringere Gesamtmenge an abgetragenem Material schließen. Insbesondere liegen nun auch auf der Strahlaustrittsseite größere Partikel in Schnitffugennähe verteilt.

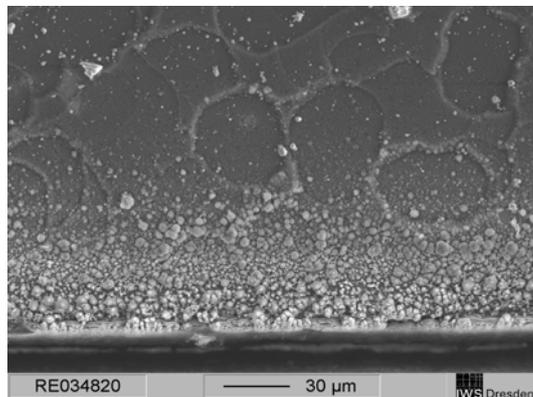


Abbildung 2.71: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Helium

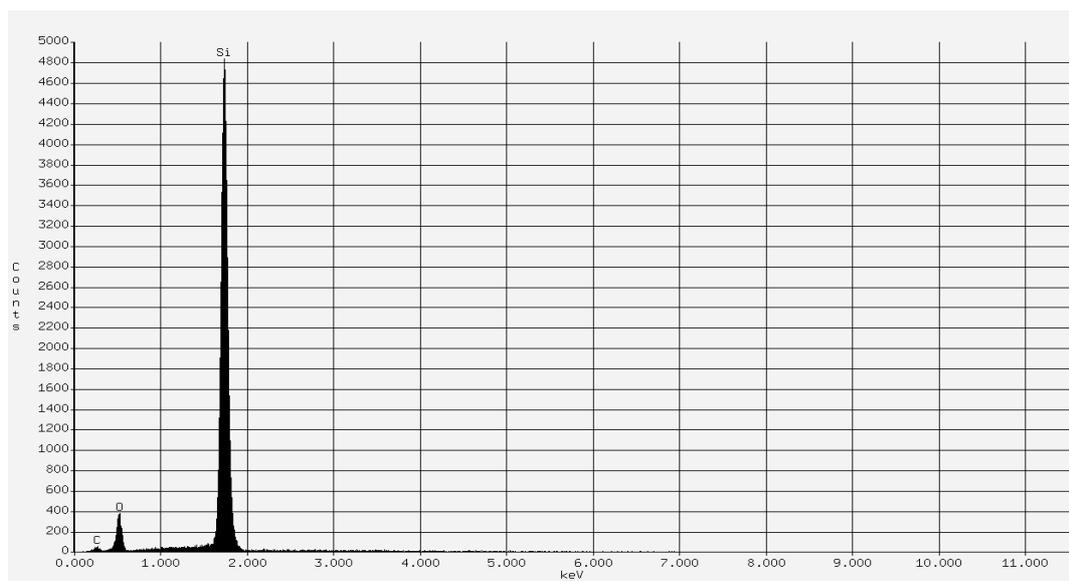


Abbildung 2.72: Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Helium

Im Zuge einer elektronenmikroskopischen Analyse wurde eine geringfügig bessere Unterdrückung der SiO_2 -Bildung gegenüber Argon festgestellt (*Abbildung 2.71*), weshalb der stärker oxidierte Bereich um die Schnittkante weniger stark ausgeprägt ist, auch erkennbar an der Peak-Höhe des O_2 -Peaks in *Abbildung 2.72* im Vergleich zu Argon. Die Ausdehnung der gebildeten Oxidschicht erstreckt sich hier - ähnlich wie bei Argon - bis ca. 180 μm vom Schnitt entfernt. Sie ist deutlich dünner ausgebildet als die mit Argon erzielte. Anhand der Linienganalyse (*Anhang C.33*) ist erkennbar, dass im Falle einer Heliumatmosphäre eine

schmalere (ca. 10 μm) und kontinuierlicher ausgeprägte Schmelzkante (verglichen mit der Argonumgebung) entsteht. Somit ist auch hier angesichts eines geringeren Schmelzaustriebs die Bildung und der Einfluss eines Plasmas nicht ausgeschlossen.

2.7.4 Vakuum

Aus Sicht der Dynamik der ablaufenden Prozesse speziell beim Sublimationsabtrag von Silizium erwies sich eine Wiederholung der unter Punkt 2.7.1 bis 2.7.3 beschriebenen Versuche in verschiedenen Gasatmosphären nunmehr bei Unterdruck interessant. Die Messungen wurden bei einem Druck unterhalb 0,08 mbar (Feinvakuum) durchgeführt.

Dabei ergab sich eine um 55 % größere effektive Schneidgeschwindigkeit (0,59 mm/s) im Vergleich zum Schneiden an Luft, die damit nur geringfügig unter der Prozessgeschwindigkeit beim Schneiden in Heliumumgebung liegt. Die schmale Schnittfugenbreite am Strahleintritt (ca. 34 μm) liegt zwischen jenen von Argon und Helium. Bei einer Schnittfugenbreite von ca. 6 μm am Strahlaustritt errechnet sich der Flankenwinkel zu $3,7^\circ$ und liegt damit ebenfalls zwischen jenen, die mit Argon und Helium erzielt wurden. Die Schnitte zeichnen sich des weiteren infolge mangelnder erstarrter Schmelze an den Fugenrändern durch relativ scharfe Schnittkanten aus.

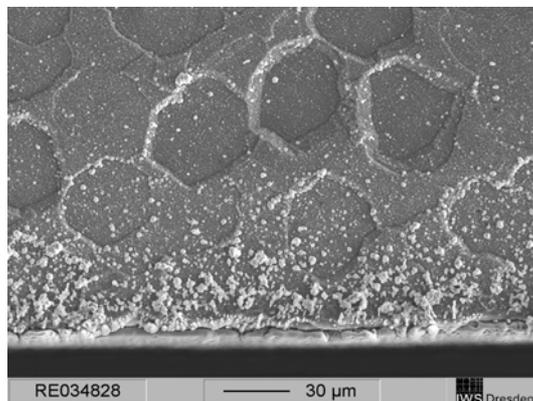


Abbildung 2.73: Sekundärelektronen (SE)-Bild (Strahleintritt) für Vakuum

Der Debris liegt vorrangig als ein sehr dünner Film bestehend aus sehr feinen Staubpartikeln vor. Wenige größere Partikel liegen insbesondere am Strahlaustritt näher um die Schnittfuge verteilt (*Abbildungen 2.67 und 2.68*). Die bräunliche Farbe (*Abbildungen 2.63 und 2.64*) dieser fein verteilten Partikel sowie geringfügige Schmelzablagerungen im SE-Bild (*Abbildung 2.73*) lassen trotz Schneiden in einer Luft-Restgas-Atmosphäre auf ein weitreichendes Unterbinden der ansonsten unter Luft stark aufgeworfenen Oxidschichten schließen. Darauf

weisen verschiedene Anlauffarben infolge Interferenzen (ringförmig um die Schnittlinien) sowie die Entstehung einer weit ausgedehnten homogenen Oxidschicht mit einer Dicke in der Größenordnung der Wellenlänge (nm-Bereich) hin.

Die oben getroffene Aussage wurde mit Hilfe der quantitativen EDX-Analyse bestätigt. Diese zeigt im Gegensatz zum Schneiden in Inertgasatmosphäre einen relativ hohen Peak für Sauerstoff, vergleichbar mit jenem der an Luft geschnittenen Proben (*Abbildung 2.74*).

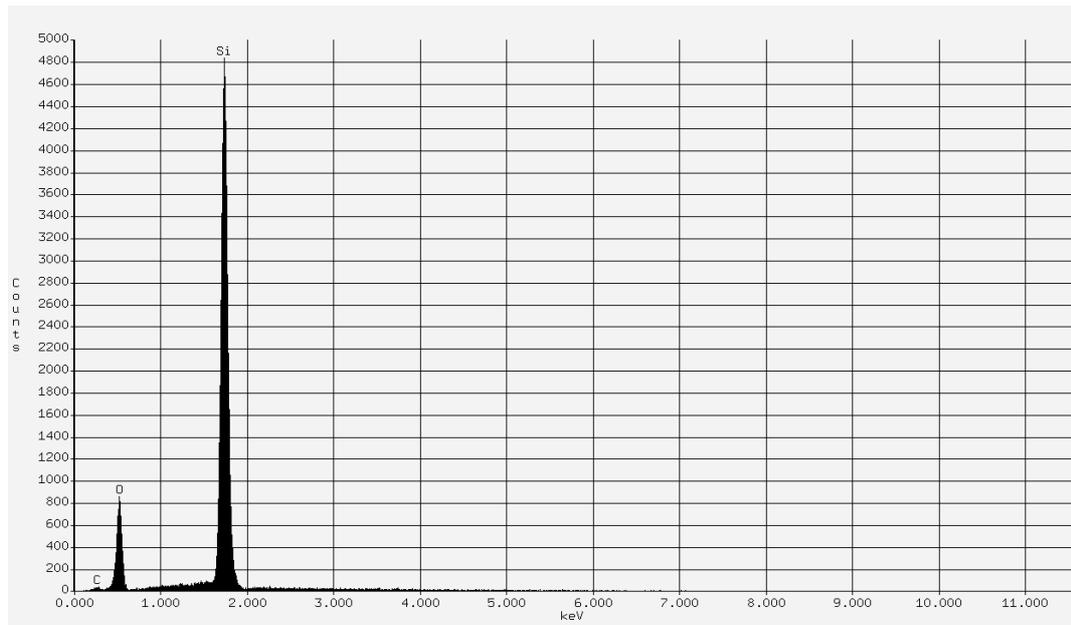


Abbildung 2.74: Quantitative EDX-Analyse der Ablagerungen (Strahleintritt) für Vakuum

Eine Linienanalyse (*Anhang C.43*) ergab, dass die entstandene Oxidschicht ausgehend von der Schnittkante kontinuierlich anwächst und bei einem Abstand von ca. 20 μm von der Schnittfuge einen kontinuierlichen Wert annimmt.

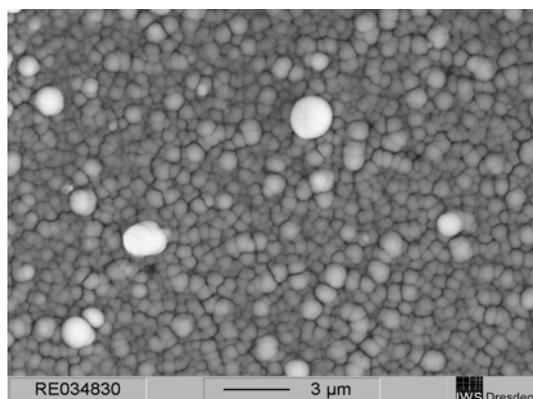


Abbildung 2.75: Waferoberfläche (Strahleintritt) für Vakuum

Betrachtet man diese Oxidschicht bei 5000facher Vergrößerung (*Abbildung 2.75*), so ähnelt die dicht geschlossene Schicht der morphologischen Struktur epitaktisch aufgewachsener Schichten.

Damit existieren verschiedene Möglichkeiten für das veränderte Erscheinungsbild der Ablagerungen auf der Siliziumoberfläche. Es besteht die Möglichkeit, dass infolge des geringeren Umgebungsdruckes und der nachweislich an den Schnittkanten und auf der Waferoberfläche geringfügiger erstarrten Restschmelze/Schmelzepartikel mehr Fugenmaterial verdampft worden ist.

Dieser Dampf hat sich anschließend sehr fein verteilt unter Oxidation auf der Waferoberfläche niedergeschlagen. Eine andere Interpretation geht davon aus, dass es infolge mangelnder Wärmeableitung durch die umgebende Atmosphäre (fehlende Wärmekonvektion im Vakuum) zu einer starken Erwärmung des Materials während der Bearbeitung mit dem Laser kam, wodurch der Sauerstoff aus dem Restgas (Luft) von der Oberfläche absorbiert wurde.

2.7.5 Auswertung

In den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass alle Probenoberflächen auch in größerem Abstand von der Schnittfuge Kontaminationen von sowohl stark oxidierten Partikeln als auch weniger oxidierten Schmelztröpfchen aufweisen. Auch in Schutzgasatmosphäre sind weiterhin Silizium-Sauerstoff-Verbindungen entstanden (vermutlich der Stöchiometrie SiO_2). Deren Ausprägung ist auf die Reinheit der Gase zurückzuführen, da ein Nachoxidieren der Proben ausgeschlossen werden kann.

Beste Ergebnisse in Bezug auf die Schnittqualität sind nach Durchführung von Analysen mittels Rasterelektronenmikroskop für Argon- und Heliumumgebungen ermittelt worden, da sich bei diesen Gasen der Bereich der Hauptablagerungen im Gegensatz zu Luft (ca. 200 μm) auf 30 μm bis 50 μm beschränkt. Ein an Luft erzeugter Schnitt hat jedoch die Eigenschaft, dass sich die erstarrte Siliziumschmelze sehr stark auf den Bereich nahe der Schnittfuge beschränkt.

Mit einem Wechsel von Reaktivgas- (Sauerstoff) zur Inertgasatmosphäre (Argon, Helium) sowie bei einer Umgebungsdruckverminderung, findet eine Verschiebung von grobkörnig aufgeworfener Schmelzeablagerung zu feinkörnigen Staubpartikeln statt, die je nach ihrer Größe in unterschiedlichen Bereichen um die Bearbeitungszone Ablagerungen bilden.

Fazit: Tendenziell steigt die Partikelgröße von feinerer Körnung zu gröberer mit Entfernung von der Schnittfuge. Die Dichte des Staubfilmes nimmt mit steigender Entfernung von der Schnittfuge ab.

Die Prozessgeschwindigkeit ist sowohl beim Schneiden in inerter Umgebung als auch im Vakuum gegenüber der beim Schneiden an Luft gesteigert worden; am stärksten jedoch in Helium (um mehr als das Doppelte; *Abbildung 2.61*). Die Schnittfugenbreiten insbesondere am Strahlaustritt verhalten sich gemäß *Abbildung 2.62* umgekehrt proportional zur Schneidgeschwindigkeit. Die kleinste Schnittfuge wurde in Helium erzielt. Bei allen Schnitten liegt positive Konizität vor.

Die ermittelten Ergebnisse stimmen weitgehend mit einer Untersuchung, bei welcher Ritzversuche anhand <100>-Siliziumwafern mit Hilfe von Laserstrahlung ($f_{\text{Rep}} = 2 \text{ kHz}$; $P_{\text{Av}} = 894 \text{ mW}$) bei einer Wellenlänge von 532 nm (grün) in den Umgebungen Luft, Vakuum, Stickstoff, Argon und Sauerstoff durchgeführt wurden, überein. Als Ausnahme war zu konstatieren, dass u.a. in Folge eines Nachbehandlungsschrittes (Ätzen mit 40 %-iger HF-Säure/ Flusssäure) beim Schneiden in einer Inertgasatmosphäre keine Oxidbildung mehr festgestellt wurde.

Als Ursache für die unterschiedlichen Bearbeitungsergebnisse in den verschiedenen Gasatmosphären sind maßgeblich deren thermische Eigenschaften zu nennen. Insbesondere die Fähigkeit des Wärmetransportes ist von Bedeutung für die Kühlung der Bearbeitungszone. Beim Schneiden in Vakuum ist die starke Abhängigkeit des Siedepunkts von Silizium vom herrschenden Umgebungsdruck zu beachten (die Siedetemperatur sinkt mit abnehmendem Druck im Feinvakuum auf nahezu die Hälfte ihres Wertes). D.h., Verringerung des Umgebungsdruckes lässt die Neigung zum Verdampfen ansteigen.

Im Vakuum entfällt der Wärmetransport durch freie Konvektion mit der Folge einer höheren Wärmeableitung über den Wafer. Das wiederum kann zu einem starken Aufheizen des Materials führen. Vorteile in bezug auf die Plasmaerzeugung ergeben sich durch eine ungehinderte, freie Expansion des abgetragenen Materials sowie eine verringerte Elektronendichte infolge niedriger Gasdichte.

Prinzipiell bewirkt eine geringere Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eine verlangsamte Abkühlung der Schmelze, daraufhin ein Ansteigen der verdampfenden Menge und auch eine Erhöhung des Dampfdrucks in der Schnittfuge (verstärkter Schmelzaustrieb).

Der Vorzug von Helium gegenüber den anderen eingesetzten Gasen ist darin zu sehen, dass es aufgrund des höchsten Wärmeleitkoeffizienten die besten Voraussetzungen bietet. [2,8,14]

2.8 Optimierte Parameter

Aufgrund der starken Anwendungsbezogenheit der Schnittqualität ist eine Optimierung mit Berücksichtigung der Qualität des Bearbeitungsergebnisses ausschließlich anhand einer konkreten Bearbeitungsaufgabe durchführbar. Daher soll im folgenden eine Strategie zur Optimierung der Schneidgeschwindigkeit unter Vernachlässigung der Schnittqualität angewendet werden. Ziel ist es, eine maximal mögliche Schneidgeschwindigkeit zu erreichen. Dabei sollen die Erkenntnisse aus den voran gegangenen Untersuchungen bezüglich der Abhängigkeit der effektiven Schneidgeschwindigkeit von den verschiedenen Einstellungsparametern heran gezogen werden. Die Tabelle (*Anhang A.12*) zeigt jeweils die maximalen und minimalen effektiven Schneidgeschwindigkeiten, die sich durch Variation des zugeordneten Einstellungsparameters ergaben.

Daraus abgeleitet sind zwei Schneidversuche unter optimierten Parametern durchgeführt worden. Um eine maximale Intensität zu erhalten, wurde das 10 W-System verwendet sowie am Attenuator (Strahlabschwächer) maximale Transmission (100 %) eingestellt. Für die Pulsfolgefrequenz musste unter der Bedingung voller Pulsleistung für einen maximalen Abtrag eine Kompromisslösung gefunden werden. Grund dafür ist, dass die Pulsparameter und die Leistungswerte in gegenseitiger Beeinflussung stehen. Wegen der Abhängigkeit der mittleren Leistung von der Repetitionsrate des Güteschalters, nimmt die Pulsenergie und die Pulsspitzenleistung mit zunehmender Pulsfrequenz systembedingt ab.[8,27,28]

Diesen Effekt verdeutlicht die Kennlinie in *Abbildung 2.76*, welche aus der Tabelle in *Anhang A.6* zur Untersuchung des Einflusses der Pulsfolgefrequenz auf das Bearbeitungsergebnis hervorgeht.

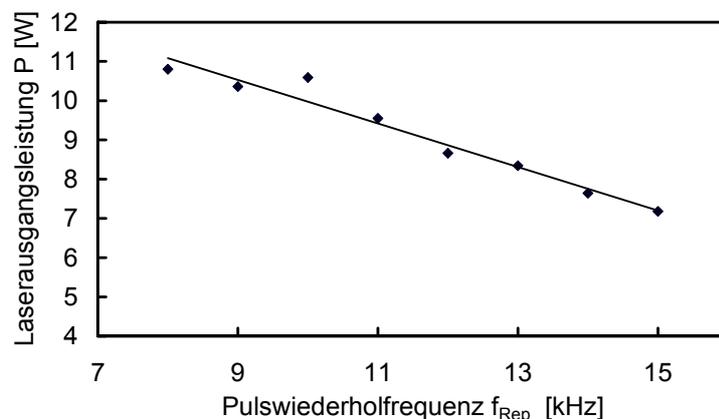


Abbildung 2.76: Abhängigkeit der Laserleistung von der Pulsfrequenz

Beim Schneiden mit einer Laserleistung von 3 W unter Verwendung des 10 W-Lasersystems konnte dieses Problem mit Hilfe des Attenuators umgangen werden. Mit der Anforderung an eine maximale Laserausgangsleistung ist die Bandbreite der Pulsparameter jedoch stark eingeschränkt. Im Sinne der Geschwindigkeitsoptimierung wurde daher eine maximale Pulswiederholrate (Repetitionsrate) von 10 kHz gewählt, bei der eine Laserausgangsleistung von 10 W bereit gestellt wurde. Weiterhin wurde mit linear polarisierter Laserstrahlung, d.h. ohne Lambda-Viertel-Platte, mit um 90° gedrehter Scanrichtung und einer Scangeschwindigkeit von 300 mm/s ca. 210 µm dickes Silizium (Kristallorientierung: <111>) geschnitten. Die Fokussierungseigenschaften (Aufweitung: 5fach; $f = 100$ mm; Fokuslage: +/- 0 mm; Werkstückoberfläche) sind wie bei den vorangegangenen Versuchen eingestellt worden. Es wurde zum einen in einer Helium-Schutzgasatmosphäre und zum zweiten in einer druckverminderten Atmosphäre (Feinvakuum) mit Helium-Restgas geschnitten (*Tabelle 2.6*). Die Ergebnisse dieser Messung sind in *Anhang A.13* zusammengefasst.

Tabelle 2.6: Optimierte Parameter

Ausgangsleistung P[W]	Pulswiederhol- frequenz f_{Rep} [kHz]	Polarisations- richtung	Schneidrich- tung/ Ablenk- winkel [°]	Materialdicke d [µm]	Scan- geschwindig- keit v_{scan} [mm/s]	Gasatmos- phäre
10	10	linear	90°	208	300	Helium
10	10	linear	90°	208	300	Vakuum + RestHelium

Es hat sich gezeigt, dass durch Kombination der Einstellparameter, welche die größte effektive Geschwindigkeit ermöglichen, eine weitere Geschwindigkeitserhöhung erzielt werden kann. Dabei beträgt die ermittelte effektive Schneidgeschwindigkeit von ca. 2 mm/s unter optimierten Bedingungen das 8,3-fache gegenüber dem Schneiden an Luft (0,24 mm/s) ohne Optimierung; das Resultat entspricht einer Steigerung von 733 %.

Das beste Ergebnis in Hinblick auf die Prozessgeschwindigkeit konnte beim Schneiden unter Heliumatmosphäre bei reduziertem Umgebungsdruck (Feinvakuum bei ca. 0,08 mbar mit Helium als Restgas) erzielt werden. Die gemessene Prozessgeschwindigkeit liegt dort nicht nur um ca. 0,23 mm/s höher als jene beim Schneiden unter Heliumatmosphäre bei Atmosphärendruck (ca. 1 bar); sie weist auch eine geringere Schwankungsbreite - erkennbar an der geringen Fehlergröße - auf.

Ein quadratischer Siliziumchip mit einer Kantenlänge von 4 mm kann somit unter optimierten Bedingungen in 7,5 s ausgeschnitten werden.

Es sei erwähnt, dass mit der effektiven Schneidgeschwindigkeit ebenso die Schnittfugenbreiten am Strahleintritt von 26 µm auf 62 µm (*Abbildung 2.77*) sowie am Strahlaustritt von 6 µm

auf $15\ \mu\text{m}$ (*Abbildung 2.78*) durch die Optimierung zugenommen haben. D.h., sie beträgt das 2,4- bzw. 2,5-fache wie für das Schneiden in Helium bei Normdruck.

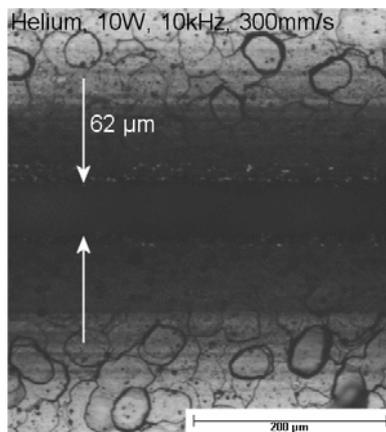


Abbildung 2.77:
Schnittfuge (Strahleintritt) für
optimierte Parameter bei ca. 1 bar

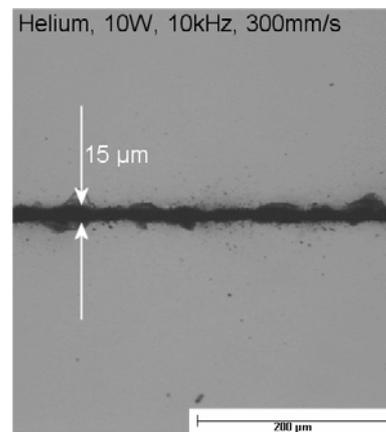


Abbildung 2.78:
Schnittfuge (Strahlaustritt) für
optimierte Parameter bei ca. 1 bar

Für das Schneiden unter Vakuum ergab sich eine Steigerung von $34\ \mu\text{m}$ auf $78\ \mu\text{m}$ und somit um das 2,3-fache am Strahleintritt (*Abbildung 2.79*) sowie von $6\ \mu\text{m}$ auf $32\ \mu\text{m}$ um das 5,3-fache am Strahlaustritt (*Abbildung 2.80*). Dementsprechend stiegen auch die Flankenwinkel der Schnittflächen sowie die Menge der Ablagerungen auf der Waferoberfläche quantitativ.

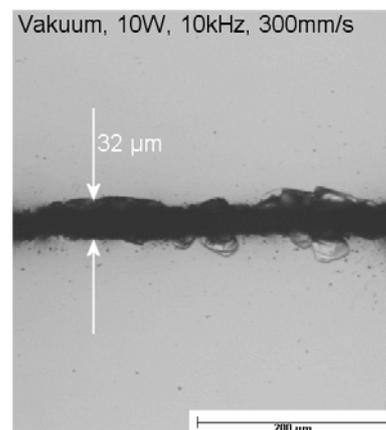
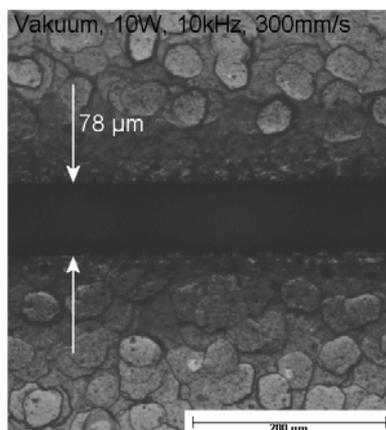


Abbildung 2.79:
Schnittfuge (Strahleintritt) für optimierte
Parameter bei ca. 0,08 mbar

Abbildung 2.80:
Schnittfuge (Strahlaustritt) für optimierte
Parameter bei ca. 0,08 mbar

2.9 Diskussion (Straf-Ziel-Methode)

Unter Punkt 2.8 wurde eine Optimierung in Hinblick auf eine maximal mögliche Schneidgeschwindigkeit durchgeführt. Die Schnittqualität ist aber nur in Ausnahmefällen vernachlässigbar. Häufig existieren neben der Schneidgeschwindigkeit noch weitere die Schnittqualität betreffende Beurteilungskriterien, welche ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Dazu ist es notwendig, die wesentlichen Einflüsse auf den Prozessverlauf zu erfassen, anschließend eine Differenzierung der Eingangsgrößen (Einstellwerte) anhand des Prozessergebnisses vorzunehmen und die für den anwendungsspezifischen Verwendungszweck passende Technologie auszuwählen (Prozessoptimierung). Die Bedeutung der Qualitätskriterien für das Bearbeitungsergebnis ist je nach Anwendung individuell zu gewichten.

Eine Möglichkeit zur Suche nach zulässigen (optimalen) Lösungen durch numerische Optimierung ist die sogenannte Straf-Ziel-Methode.[15] Sie basiert auf der „Bestrafung“ derjenigen Lösungen, welche die an das Bearbeitungsergebnis gestellten Forderungen (Restriktionen) nicht erfüllen, indem der Grad der Restriktionsverletzungen als Zielfunktion formuliert wird.

$$\text{Strafpunkte} = f(\text{Grad der Restriktionsverletzung})$$

Die damit erhaltene Gesamtgüte der Straf-Ziel-Funktion formiert sich durch einfache Addition als Summe von gewichteten Strafpunkten (Restriktionsverletzungen), die jeweils den Grad der Verletzung für die einzelnen Restriktionsgrößen widerspiegeln. Die Berechnung der Strafpunkte erfolgt dabei über einen quadratischen Ansatz aus dem Abstand (Distanz) des Istwertes (Restriktionsgröße) zu einem gegebenen Grenzwert bzw. einem zulässigen Bereich. Voraussetzung ist die Normierung jeder Restriktionsgröße (Bildung der normierten Distanz) zu einem Grenzwert oder zu einem zulässigen Bereich der Restriktionsgröße. Im Flussdiagramm in *Abbildung 2.81* sind die wichtigsten Schritte zur Aufstellung der Zielfunktion systematisch dargelegt.

Neben dem Definieren von Forderungen müssen die Wichtungsfaktoren k_i der Einzelbestrafung festgelegt werden. Während durch Verschärfung der Forderungen immer bessere Lö-

sungen aufgezeigt werden, beeinflusst man über die Wichtigkeitsfaktoren, wie gut die Forderungen bei einer Kompromisslösung noch erfüllt werden müssen.

Anhand eines Fallbeispiels der Firma Infineon Technologies AG soll diese Methode in Bezug auf die an die Schnittqualität beim Wafersägen gestellten Anforderungen für einen variablen Parameter angewendet werden.

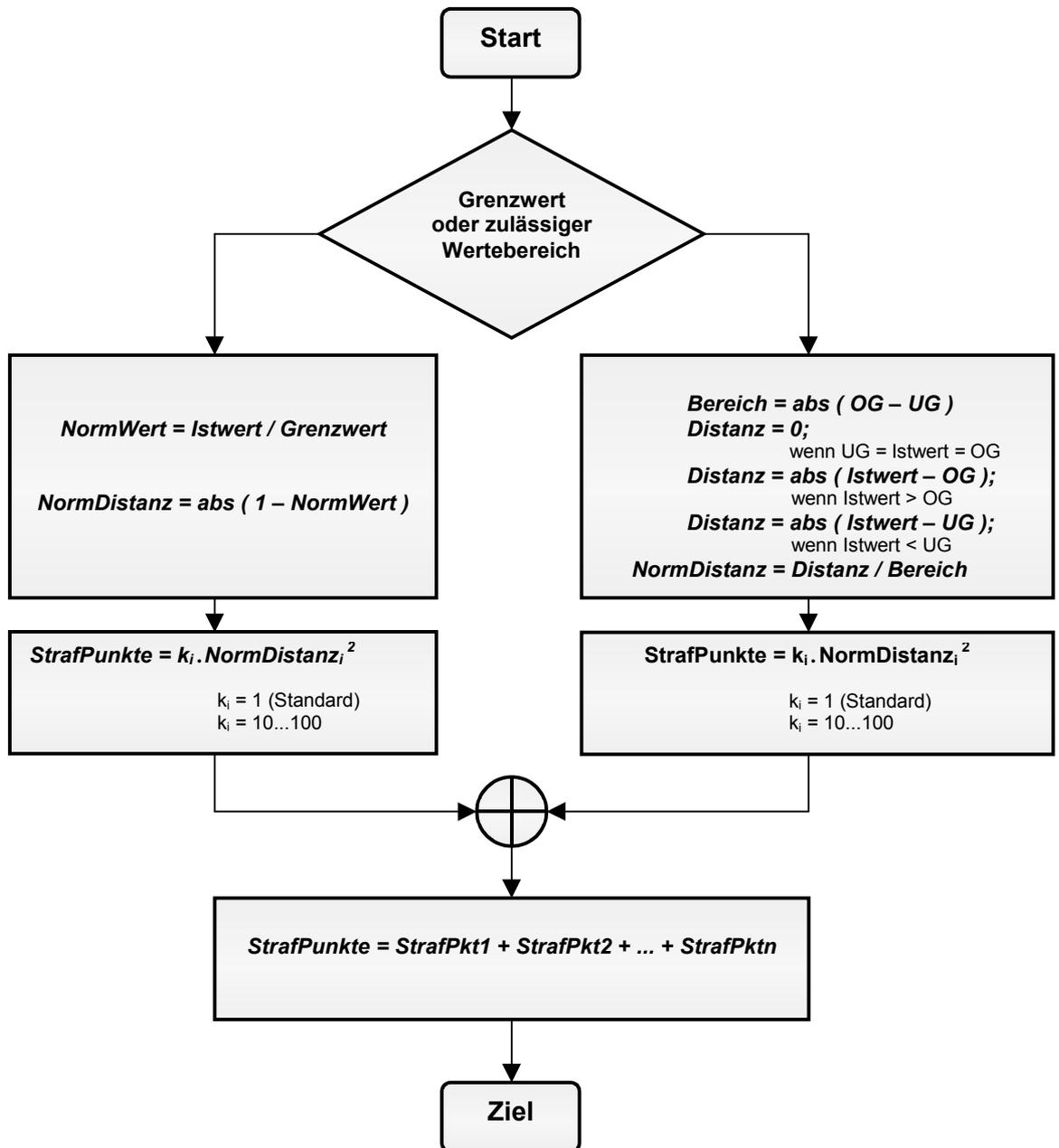


Abbildung 2.81: Straf-Ziel-Methode schematisch

Folgende Randbedingungen wurden als Forderungen definiert: Die erreichbare Maximalgeschwindigkeit soll so hoch wie möglich sein, da die Geschwindigkeit bei der Laserbearbeitung noch nicht mit dem Wafersägen vergleichbar ist, wird hier als Grenzwert $v_{soll} = 2,2$ mm/s, d.h. die durch Optimierung maximal erreichte Geschwindigkeit, eingesetzt.

Generell werden für Schnittfugenbreiten (am Strahleintritt und am Strahlaustritt) zur Reduzierung des Materialverlusts und damit zur Erhöhung der Packungsdichte auf den Siliziumscheiben Minimalwerte angestrebt. Aufgrund der in den bestehenden Produktionslinien jedoch integrierten automatisierten Technik des „pick-and-place“, kann es bei Schnittfugenbreiten kleiner als 30 µm unter Umständen zu Problemen durch ein Verkannten der Chips beim Herausnehmen kommen. Daher werden Schnittfugen im Bereich zwischen 30 µm und 70 µm toleriert ($w_{\text{soll}} = (30 - 70) \text{ µm}$).

Weiterhin werden parallele Schnittfugen angestrebt. Da die Definition eines Grenzwertes mit dem Wert ‚0‘ aus mathematischen Gründen nicht möglich ist, wird auch hier ein Wertebereich von $\alpha_{\text{soll}} = (0 - 1)^\circ$ definiert, womit zudem auf eine positive Konizität der Schnittfuge abgezielt wird.

Ausserdem wichtig für die Halbleiterindustrie sind die Materialablagerungen (Debris) insbesondere auf der Waferoberseite, auf der sich auch die erzeugten Strukturen befinden. Mit dem Ritzrahmen (kerf), dessen Breite derzeit zwischen 100 µm und 110 µm beträgt, wird der Bereich festgelegt, in dem neben den Sägestrassen Kantenausbrüche bzw. Materialabplatzungen (chipping) sowie Partikelkontaminationen auftreten können ($k_{\text{soll}} = (0 - 100) \text{ µm}$). Damit ergab sich nach dem in *Abbildung 2.81* dargestellten Flussdiagramm für die Zielfunktion folgende Formel:

$$\begin{aligned} \text{StrafPunkte} = & k_v \cdot \text{NormDistanz}_v^2 + k_{w,SE} \cdot \text{NormDistanz}_{w,SE}^2 + k_{w,SA} \cdot \text{NormDistanz}_{w,SA}^2 \\ & + k_\alpha \cdot \text{NormDistanz}_\alpha^2 \cdot k_k \cdot \text{NormDistanz}_k^2, \end{aligned} \quad (15)$$

wobei gilt:

$$\text{NormDistanz}_v = \left| \frac{v_{\text{Ist}}}{2,2\text{mm/s}} \right|$$

$$\text{NormDistanz}_{w,SE} = \left| \frac{w_{\text{Ist}} - 30 \text{ µm}}{70 \text{ µm} - 30 \text{ µm}} \right| \quad \text{oder} \quad \text{NormDistanz}_{w,SE} = \left| \frac{w_{\text{Ist}} - 70 \text{ µm}}{70 \text{ µm} - 30 \text{ µm}} \right|$$

$$\text{NormDistanz}_{w,SA} = \left| \frac{w_{\text{Ist}} - 30 \text{ µm}}{70 \text{ µm} - 30 \text{ µm}} \right| \quad \text{oder} \quad \text{NormDistanz}_{w,SA} = \left| \frac{w_{\text{Ist}} - 70 \text{ µm}}{70 \text{ µm} - 30 \text{ µm}} \right|$$

$$\text{NormDistanz}_\alpha = \left| \frac{\alpha_{\text{Ist}} - 0^\circ}{1^\circ - 0^\circ} \right|$$

$$\text{NormDistanz}_k = \left| \frac{k_{\text{Ist}} - 100 \mu\text{m}}{100 \mu\text{m} - 0 \mu\text{m}} \right|$$

Es besteht für den Anwender die Möglichkeit, durch Festlegung anderer Grenzwerte bzw. zulässiger Bereiche sowie die Wahl der Bewertungsfaktoren entsprechend den Anforderungen und Wünschen an die jeweilige Bearbeitungsaufgabe optimale Einstellungswerte herauszufinden.

Durch Setzen anderer Prioritäten, gleichbedeutend mit einer Veränderung der Bewertungsfaktoren, kann es unter Umständen zu einer Verschiebung des Optimums kommen. Beim Auftragen der jeweils ermittelten Strafpunkte über dem variierten Einstellparameter, ergibt sich das Optimum im Diagramm an der Stelle mit dem niedrigsten Größenwert, d.h. den wenigsten Strafpunkten. Anhand der Ergebnisse der Atmosphärgasuntersuchung soll diese Verschiebung im folgenden demonstriert werden.

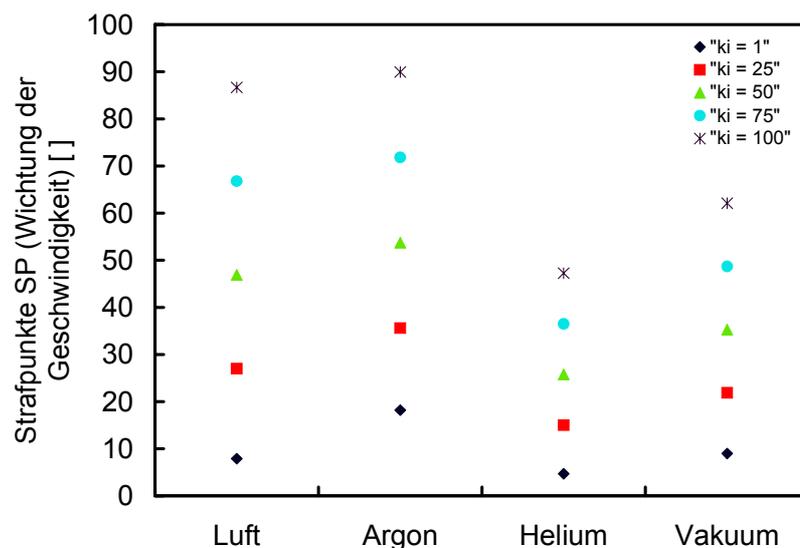


Abbildung 2.82: Wichtung der Geschwindigkeit

In *Abbildung 2.82* ist der Bewertungsfaktor für die Geschwindigkeit kontinuierlich (in 25er-Schrittweite) erhöht worden. Als Ausgangspunkt sind alle Bewertungsfaktoren ,1' gesetzt worden.

Helium bildet mit den niedrigsten Strafpunkten das Optimum, dicht gefolgt von Luft. Infolge der Erhöhung des Bewertungsfaktors für die Geschwindigkeit, kristallisiert sich Helium als optimale Lösung noch stärker heraus. Der Abstand zu den Werten für Argon, Vakuum und vor allem Luft vergrößert sich durch stärkeres Anwachsen der Strafpunkte. Die guten Ergebnisse für Luft für niedrige Geschwindigkeitsbewertung beruhen auf den vierfach eingehenden

Qualitätskriterien, die die „Bestrafung“ gegenüber dem einfach eingehenden Kriterium für die Geschwindigkeit dominiert haben.

In *Abbildung 2.83* wird die Schnittfugenbreite am Strahleintritt verstärkt bewertet. Die Kurven für die verschiedenen Bewertungsfaktoren sind relativ konform und divergieren geringfügig bei Helium. Mit zunehmender Priorität zu schmalere Schnittfugen am Strahleintritt, verändert sich das Optimum bei Helium geringfügig zu schlechteren Werten, d.h. höheren Strafpunkten. Obwohl die Abstände zu Werten der anderen Gase kleiner werden, bleibt Helium gegenüber den anderen Atmosphären die günstigere Variante.

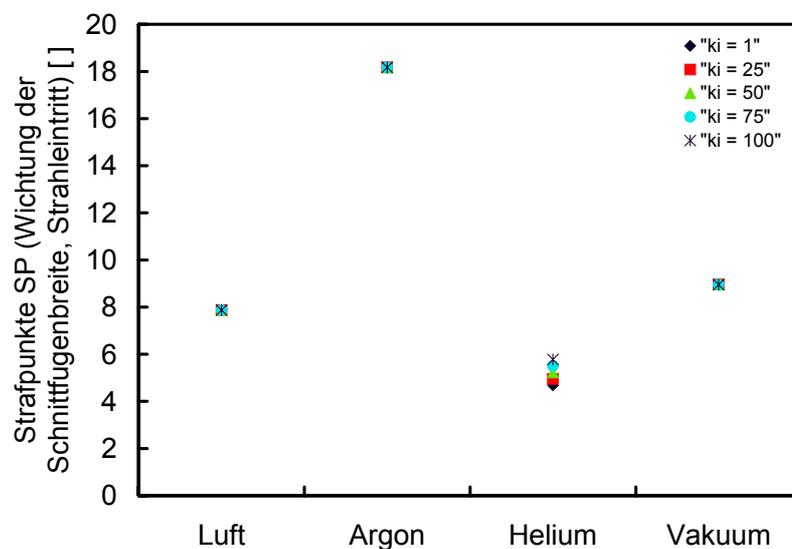


Abbildung 2.83: Wichtung der Schnittfugenbreite (Strahleintritt)

Mit höherem Bewerten der Schnittfugenbreite am Strahlaustritt mit Faktoren zwischen 1 und 100, kommt es zu einem Wechsel des Optimums von Helium zu Luft als Atmosphärgas. Helium hat gemäß Punkt „Einfluss der Gasatmosphäre“ (*Anhang A.11 und Abbildung 2.84*) eine geringfügig schmalere Schnittfuge (6 μm) am Strahlaustritt als Luft (8 μm),

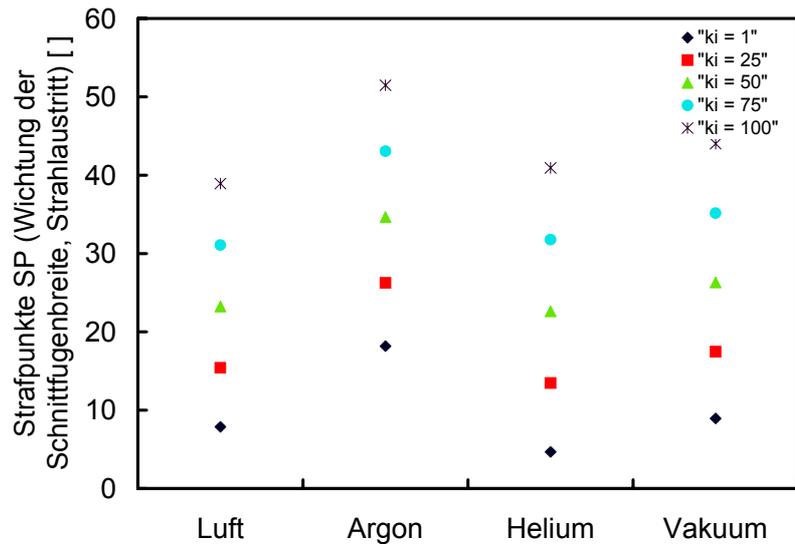


Abbildung 2.84: Wichtung der Schnittfugenbreite (Strahlaustritt) was bei genügend hoher Bewertung dazu führt, dass andere positive Bearbeitungseigenschaften von Helium in den Schatten gestellt werden.

Anders verhält es sich bei Bewertung des Flankenwinkels. Mit zunehmender Erhöhung des Bewertungsfaktors verstärkt sich der Einbruch der Gesamtgüte über Helium (Abbildung 2.85). Da die in Heliumatmosphäre erzeugten Schnitte die größte Neigung zur Parallelität aufweisen, erweist sich Helium als Prozessgas an dieser Stelle als günstiger.

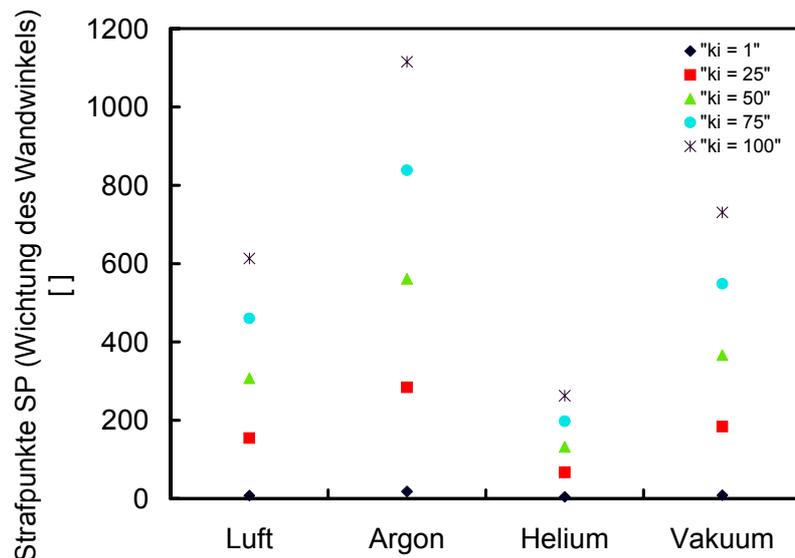


Abbildung 2.85: Wichtung des Wandwinkels

In *Abbildung 2.86* ist eine größere Ablagerungsausdehnung als die vom Ritzrahmen vorgegebene Breite zunehmend „bestraft“ worden. Damit hat sich auch hier das Optimum von

vormals Helium zu Luft verschoben. Durch die stark oxidierten Schmelzablagerungen beim Schneiden an Luft, liegen die Ablagerungen direkt an der Schnittfuge und besitzen somit eine geringere Ausdehnung.

Wie schon anhand der Wichtung eines einzelnen Ergebnisparameters festgestellt wurde, kann es unter Umständen zu einem Umkippen des Optimums von einem Einstellungsparameter auf einen anderen kommen. Aufgrund dessen, dass die Ergebnisparameter Prozessgeschwindigkeit und Schnittqualität in Abhängigkeit von dem jeweiligen Einstellungsparameter gegenläufig ausfallen können, wird mit einer Optimumverschiebung auch bei Betrachtung der beiden Extremfälle höchste Schneidgeschwindigkeit und beste Schnittqualität gerechnet.

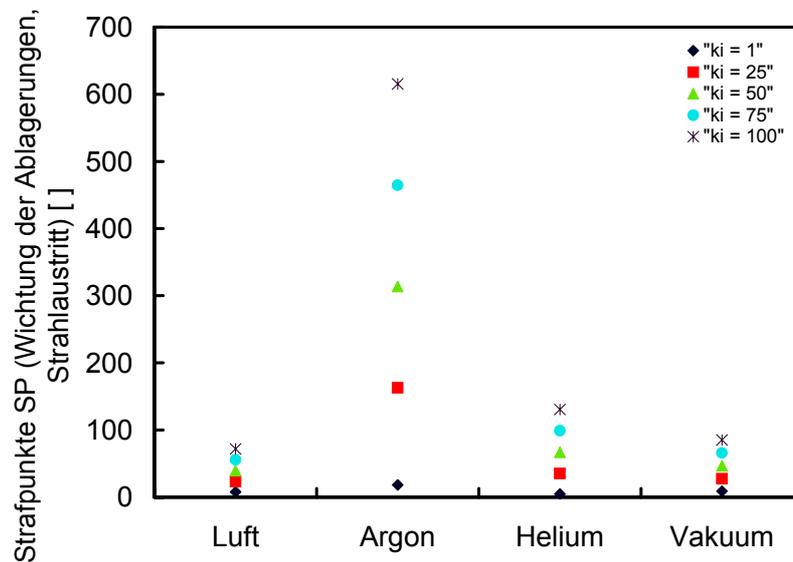


Abbildung 2.86: Wichtung der Ablagerungen (Strahleintritt)

In *Abbildung 2.87* ist dies für den Einstellparameter Laserleistung realisiert worden.

Dabei wurde mit dem Ziel der höchsten Schneidgeschwindigkeit der Bewertungsfaktor für die Geschwindigkeit auf den Wert 100 gesetzt, während die Bewertungsfaktoren für die Schnittqualität standardmäßig auf dem Wert 1 belassen wurden. Umgekehrt wurde bei der Anforderung nach bester Schnittqualität verfahren.

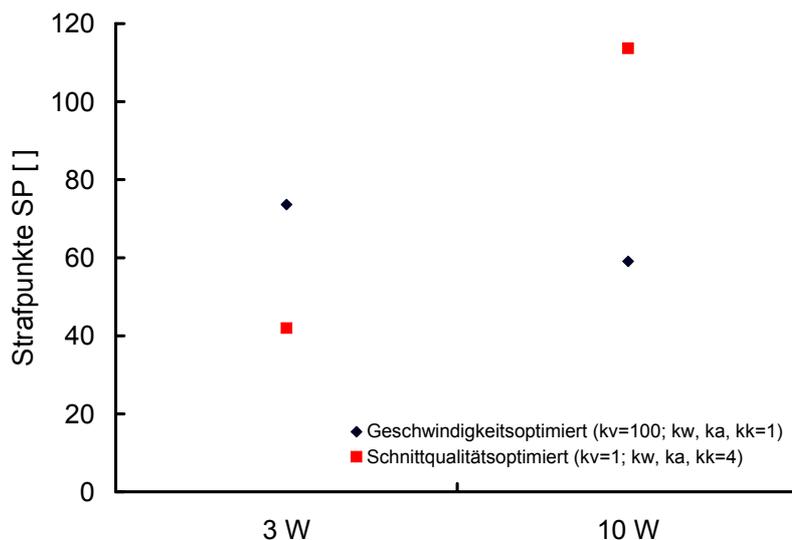


Abbildung 2.87: Straf-Ziel-Methode a) Ziel: höchste Schneidgeschwindigkeit
b) Ziel: beste Schnittqualität

Die Bewertungsfaktoren für die Schnittqualität (Schnittfugenbreiten am Strahlein- und Strahlaustritt, Wandwinkel, Ablagerungen am Strahleintritt) wurden, da sie zahlenmäßig stärker in die Bewertung eingehen, auf 4 angehoben. Im Gegensatz dazu wurde der Bewertungsfaktor für die Schneidgeschwindigkeit wieder auf 1 zurückgesetzt.

Wie *Abbildung 2.87* zeigt, kommt es bei Betrachtung der beiden Extremfälle zu einem Umschlagen des Optimums: Wird mehr Wert auf eine hohe Prozessgeschwindigkeit gelegt, liegt der optimale Einstellwert der Laserleistung bei 10 W. Anders fällt das Ergebnis aus, wenn die Schnittqualität Priorität hat. Dann ergeben sich für 3 W Laserausgangsleistung niedrigere Strafpunkte und damit bessere Bedingungen für das Bearbeitungsergebnis.

Zusätzlich zur Suche des Optimums innerhalb eines variierten Parameters besteht infolge der Normierung jedoch auch die Möglichkeit, verschiedene Messreihen mit Variation von unterschiedlichen Einstellparametern untereinander zu vergleichen. Um einen unverfälschten Eindruck der Werte und ihrer Abhängigkeiten zu erhalten, ist es günstiger, wenn alle anderen konstanten Parameter übereinstimmen. Dies war mit Ausnahme der Messungen der Einflüsse der Oberflächenvorbehandlung und der Fokusslage der Fall. Bei der Bestimmung des Einflusses der Fokusslage beispielsweise, wurde an Stelle eines ca. 210 µm dicken Siliziumwafers ein 336 µm dicker Siliziumwafer verwendet. Durch die bei dieser Messung allgemein niedrigeren effektiven Schneidgeschwindigkeiten infolge einer größeren Materialdicke fallen die bewerteten Ergebnisse (Strafpunkte) generell ungünstiger aus.

Durch Vergleich der Werte für die Strafpunkte in den jeweiligen Tabellen in *Anhang A* (alle Bewertungsfaktoren betragen ,1'), ergeben sich Minimalwerte, die zwischen 1,0 und 2,0

Strafpunkten liegen für folgende Parameterkonstellationen:

Laserparameter: $P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert;
Fokussierung: $f = 100 \text{ mm}$; $\pm 0,0 \text{ mm}$;
Verfahrensparameter: Luft; Scanner; 50 mm/s ; 0° (horizontal) und 135° (diagonal);
Materialparameter: ca. $210 \mu\text{m}$; $\langle 100 \rangle$; poliert

Laserparameter: $P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert;
Fokussierung: $f = 100 \text{ mm}$; $\pm 0,0 \text{ mm}$;
Verfahrensparameter: Luft; Scanner; $1, 25$ und 50 mm/s ; 0° (horizontal);
Materialparameter: ca. $210 \mu\text{m}$; $\langle 111 \rangle$; geschliffen

Laserparameter: $P = 3 \text{ W}$; $f_{\text{Rep}} = 10 \text{ kHz}$; zirkular polarisiert;
Fokussierung: $f = 100 \text{ mm}$; $\pm 0,0 \text{ mm}$;
Verfahrensparameter: Luft; Tisch; $0,17$ und $0,83 \text{ mm/s}$; 0° (horizontal);
Materialparameter: ca. $210 \mu\text{m}$; $\langle 111 \rangle$; geschliffen

Die Schnittqualität geht dabei mit 4 Bewertungskriterien vierfach gegenüber der Schneidgeschwindigkeit ein. Um dies auszugleichen, kann das Kriterium für die Schneidgeschwindigkeit standardmäßig mit dem Faktor 4 multipliziert werden.

Da Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität häufig gegenläufige Ergebnisparameter darstellen, ist deren gleichzeitige Steigerung nicht unbedingt möglich. An dieser Stelle ist es erforderlich, sich eines geeigneten Verfahrens zur Ermittlung optimaler Lösungen für eine spezielle Bearbeitungsaufgabe im Sinne eines Kompromisses zu bedienen. Anhand eines Beispiels konnte nachgewiesen werden, dass mit Hilfe der Straf-Ziel-Methode anwendungsspezifische Anforderungen an die Bearbeitungsaufgabe mit Vergabe von Prioritäten berücksichtigt werden können und im Resultat zur Feststellung der optimalen Einstellparameter führen.

3 Zusammenfassung/Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, anhand eines Kurzpuls-Lasers Strategien zur Steigerung der Ergebnisparameter Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität aufzuzeigen. Dazu war es erforderlich, die Wirkungsweise der einstellbaren Bearbeitungsparameter auf das Bearbeitungsergebnis (Schneidgeschwindigkeit, Schnittqualität) zu untersuchen sowie daraus weitere Qualifizierungsmöglichkeiten abzuleiten. Untersucht wurden neben Werkstoff- und Laserparametern auch relevante Verfahrensparameter wie die Fokusslage, die Schneidtechnologie, d.h. Art und Geschwindigkeit der Ansteuerung zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl, sowie der Einfluss diverser Prozessgase. Daraus resultiert, dass sich der Laser insbesondere für kleinere Materialdicken eignet, wobei ca. 210 µm dicke Wafer (unter Optimierung) noch effizient getrennt werden können. Materialeigenschaften wie die Kristallorientierung und die Oberflächenbeschaffenheit zeigen nur einen vernachlässigbar geringfügigen Einfluss auf Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreiten.

Dagegen kann beim Schneiden mit parallel zur Schneidrichtung linear polarisierter Laserstrahlung die Schnittfugenbreite verringert und die Schneidgeschwindigkeit erhöht werden. Mit Zunahme der Laserleistung steigen Schneidgeschwindigkeit sowie Schnittfugenbreiten relativ stark an. Die Erhöhung Pulsfrequenz bewirkt einen Anstieg der Schneidgeschwindigkeit; auf die Fugenbreiten ist ihr Einfluss nicht signifikant.

Für die optimale Fokusslage wurden auf der Basis von Messungen unterschiedliche Werte für Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität ermittelt. Während sich die im Sinne einer maximalen Schneidgeschwindigkeit bestimmte optimale Fokusslage um ca. 0,15 mm unterhalb der

Waferoberseite im Materialinneren befindet, liegt die Fokuslage im Hinblick auf die Schnittqualität (geringe Schnittfugenbreiten, parallele Schnittflächen) bei ca. 0,40 mm unterhalb der Waferoberseite; das bedeutet bei einem 200 µm Wafer 0,20 mm unterhalb der Waferunterseite.

Ein starker Einfluss vor allem auf die Prozessgeschwindigkeit wurde auch der Scangeschwindigkeit bzw. dem Vorschub beigemessen. Mit zunehmender Scangeschwindigkeit steigt die Prozessgeschwindigkeit zunächst kontinuierlich an und nähert sich für hohe Scangeschwindigkeiten einem Grenzwert. Dabei trat ab Werten von ca. 75 mm/s die Besonderheit einer einseitigen Schnittfugenverbreiterung auf der Strahlaustrittsseite auf, welche einen Wechsel von positiver zu negativer Konizität der Schnittfuge bewirkte (Schnittfuge verbreitert sich von der Strahleintrittsseite zur Strahlaustrittsseite hin). Weiterhin konnte festgestellt werden, dass bei hohen Scangeschwindigkeiten schwieriger reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Korngröße und Porosität sowie Ausdehnung der Ablagerungen sind ebenfalls an die Scan- bzw. Relativgeschwindigkeit gebunden, wie gezeigt werden konnte. Allgemein liegen Ablagerungen entweder in Form eines stark oxidierten Schmelzaufwurfs und/oder in Form feiner Staubpartikel vor in Abhängigkeit davon, wie stark Schmelzschneiden und Sublimationsschneiden anteilmäßig vertreten sind. Wie nachgewiesen werden konnte, korrespondiert die Menge an abgetragenen und abgelagertem Material zum einen mit der Materialdicke und zum anderen mit der Schnittfugenbreite. Alle Probenoberflächen weisen auch in größerem Abstand von der Schnittfuge (cm-Bereich) Partikelkontaminationen auf. Eine vollständige Unterdrückung der Oxidbildung konnte jedoch auch in diversen Schutzgasatmosphären nicht erzielt werden. Helium lieferte in Bezug auf Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität beste Ergebnisse. Weiterhin konnte eine Tendenz zu größeren Schneidgeschwindigkeiten aber auch größeren Schnittfugenbreiten mit Absenkung des Umgebungsdrucks (Vakuum) festgestellt werden.

REM-Aufnahmen belegen, dass es im Falle von Luft als Restgas zur Ausbildung einer homogenen Oxidschicht mit einer Dicke im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts kommt, welche sich nahezu über die gesamte Oberfläche (cm-Bereich) erstreckt.

Für weiterführende Untersuchungen sind Versuche mit verschiedenen Pulslängen sowie Brennweiten der Bearbeitungsoptik angezeigt. Bei Verwendung einer Fokuspachführung ist eine weitere Geschwindigkeitssteigerung vor allem bei der Bearbeitung dickerer Materialien durch konstante Intensitäten an der Schneidfront zu prognostizieren.

Um die optimalen Einstellungsparameter für den jeweiligen Anwendungsfall zu ermitteln, erwies sich die sogenannte Straf-Ziel-Methode als ein geeignetes Verfahren. Über Definition zulässiger Wertebereiche bzw. Grenzwerte für das Bearbeitungsergebnis und Wichtung an-

hand frei wählbarer Bewertungsfaktoren kristallisieren sich so die anwendungsspezifisch optimalen Lösungen für die Bearbeitungsaufgabe heraus.

Zur Beurteilung der Schnittqualität wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit hauptsächlich die oberflächlichen Spuren des Materialabtrags (Schnittfugengeometrie, Erscheinung und Zusammensetzung der Ablagerungen) qualitativ und quantitativ erfasst.

Für die Herstellung beispielsweise mikroelektronischer Bauteile aus Silizium kann u.a. eine Untersuchung der Auswirkungen des Wärmeeinflusses beim Laserstrahlschneiden auf mögliche Kristallfehler im Materialinneren von Bedeutung sein. Versetzungen und andere Defekte (Punktdefekte, punktuelle Fehlstellenhaufen) sowie eine mögliche Entstehung von polykristallinem Silizium durch Ausbildung von Kristalliten mit unterschiedlicher Orientierung und Korngrenzen beim Aufschmelzen und Wieder-Erstarren, können zu Gebieten mit unterschiedlicher Ladung sowie Streu- und Fangzentren frei beweglicher Ladungsträger führen. Eine Untersuchung der Änderung der Versetzungsdichte, z.B. mit Hilfe einer Feinstrukturanalyse (Röntgen-Diffraktometrie), durch spezielle chemische Ätztechnik oder im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) kann deshalb erforderlich sein.

Das seitens führender Vertreter der Halbleiterherindustrie wiederholt benannte Problem bei der Bearbeitung mit Laser besteht vornehmlich in starken oberflächlichen Materialablagerungen und hohen Schmelzaufwürfen. Diese können erzeugte Strukturen zusetzen und in ihrer Funktion beeinträchtigen sowie sich auf weitere Technologieschritte wie beispielsweise das Bonden störend auswirken. Beim Trennen mittels Wafersäge werden diese z.B. durch ein Aufbringen von Schutzschichten oder Schutzfolie sowie durch das kontinuierliche Spülen mit Wasser vermieden. Ähnliche Maßnahmen können auch zur Verbesserung der Schnittqualität beim Laserstrahlschneiden Verwendung finden.

Dabei haben sich zwei Möglichkeiten zur Vermeidung/Entfernung bzw. Verringerung von Ablagerungen auf der Waferoberfläche herauskristallisiert:

1. Die entstandenen Ablagerungen, Oxidschichten und Schmelzrückstände in der Schnittfuge können in einem Nachbearbeitungsschritt (Ultraschallreinigungsbad, Ätzen in 40 %-iger Flußsäure (HF), HNA-Lösung¹⁾ oder 30 %-iger KOH²⁾ bei 70 °C) nach Kenntnisstand effektiv entfernt werden.
2. Durch das Aufbringen bestimmter Schutzschichten auf die Waferoberfläche (Ätzstoppschichten; z.B. Si₃N₄⁴⁾- und SiO₂³⁾-Schichtkonfigurationen oder Klebefolie), die nach der Strukturierung selektiv vom Substrat entfernt werden können, wird ein Angreifen und Zerstören der Oberfläche und Strukturen durch die Partikel abgetragenen Materials vermieden. Diese Schutzschichten sollten bezüglich der verwendeten Wellenlänge

transparent sowie zum Schutz des Substrats vor einem Ätzangriff gegenüber KOH beständig sein. Außerdem verhindern ein hoher Schmelzpunkt sowie ein geringer Wärmeleitkoeffizient das Durchbrennen flüssiger Schmelze bis auf die Waferoberfläche oder ein Aufheizen, das zur Änderung der Kristallstruktur führt, aufgrund von Wärmeleitung.

-
- 1) HNA-Lösung: bestehend aus HF, HNO₃ und CH₃COOH (Ätzrate des Siliziums: 60µm/min), isotrope Ätze
 - 2) KOH: Kaliumhydroxid/ Kalilauge, anisotropes Ätzmedium
 - 3) Siliziumoxid
 - 4) Siliziumnitrid

Literaturverzeichnis

Bücher, Tagungsbände, Zeitschriftenbände, Hochschulschriften, Forschungs- und Entwicklungsberichte

- [1] BENEKING, HEINZ: *Halbleiter-Technologie : eine Einführung in die Prozesstechnik von Silizium und III-V-Verbindungen*. Stuttgart : Teubner, 1991. - ISBN 3-519-06133-3
- [2] BERGMANN, H. W. (Bearb.): *Laser in der Materialbearbeitung Bd. 5 : Präzise optische Bearbeitung von Festkörpern : Oberflächenbearbeitung*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1996. - ISBN 3-18-401599-8
- [3] BEYER, ECKHARD (Red.): *Laser in der Materialbearbeitung. Bd. 1 : Schneiden mit CO₂-Lasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1993. - ISBN 3-540-62246-2
- [4] BIMBERG, DIETER (Mitverf.): *Kontakt und Studium. Bd. 13 Elektronik : Laser in Industrie und Technik : Grundlagen, Materialbearbeitung, Umweltschutz, Holographische Methoden in Messtechnik und Datenverarbeitung*. Sindelfingen : expert, 1985. - ISBN 3-88508-879-7
- [5] BLIEDTNER, J.; SCHOELE, H.; MÖLLER, K.: Laserstrahltrennen von Siliziumsubstraten. In: DVS-Bericht 221: *Moderne Lasertechnologien und ihre Anwendungen (2002)*, S. 249-251. - ISBN 3-87155-678-5

-
- [6] CORBOLINE, TOM; REA, EDWARD C.; DUNSKY, COREY: High Power UV Laser Machining of Silicon Wafers. In: Proc. of SPIE Vol. 5063: *Laser Precision Microfabrication* (2003), S. 495-500. - ISBN 0-8194-4869-9
- [7] DÄNDLIKER, RENÉ: *Eine kurze Einführung in die Physik und Terminologie der Laser (Laser-Kurzlehrgang); Erläuterung der wichtigsten Begriffe aus dem Bereich der Gas-, Festkörper-, Farbstoff- und Halbleiterlaser sowie der Nichtlinearen Optik und der Holographie*. Aarau [u.a.] : AT-Verl., 1989. - ISBN 3-85502-379-4
- [8] DAUER, STEFAN: *Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik*. Bd. 3 : *Nd:YAG-Laserstrukturierung in der Silizium-Mikromechanik*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1999. - ISBN 3-8265-4978-3/ ISSN 1433-1438
- [9] DÖTSCHEL, MICHAEL: *Mikrobearbeitung von Silizium mit diodengepumpten frequenzvervielfachten Nd:YAG Laser*. Zwickau, Westsächs. Hochschule Zwickau (FH), Physikalische Technik/ Informatik, Praktikumsarbeit, 2003
- [10] ENGEMANN, BERND K.; et al.: *Kontakt und Studium*. Bd. 362 Verfahrenstechnik : *Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl : Anwendung, Erfahrungen, Ausblick*. Ehningen bei Böblingen : expert, 1993. - ISBN 3-8169-0748-2
- [11] GROPP, ARMIN (Red.): *Laser in der Materialbearbeitung*. Bd. 3 : *3D-Bearbeiten mit CO₂-Hochleistungslasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995. - ISBN 3-18-401520-3
- [12] HERZIGER, GERD: Anwendungen und Perspektiven der Lasertechnik. In: Vorträge Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften: *Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften; Vorträge N380*. Opladen : Westdt. Verl., 1990. S. 7-45. - ISBN 3-531-08380-5/ ISSN 0066-5754
- [13] HILLERINGMANN, ULRICH: *Teubner Studienbücher. Elektrotechnik : Silizium-Halbleitertechnologie*. Leipzig : Teubner, 2002. - ISBN 3-519-20149-6
- [14] HÜGEL, HELMUT: *Teubner Studienbücher. Maschinenbau : Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart : Teubner, 1992. - ISBN: 3-519-06134-1

-
- [15] KAMUSELLA, ALFRED: *Vorlesung Konstruktionstechnik : Numerische Optimierung im Konstruktionsprozess*. Dresden, Technische Universität Dresden, Feinwerktechnik und Elektronik-Design, Vorlesungsskript, 2003.
URL: http://www.ifte.de/lehre/konstruktionstechnik/2003_04/index.html
(2004-02-11)
- [16] KAUFMANN, THOMAS; Frauenhoffer, Frank; Dorner, Johann: Laser water-jet based dicing. In: *European Semiconductor*, Bd. 22 (2000), Nr. 4, S. S109-S110. - ISSN 0265-6027
- [17] KLOTZBACH, UDO; PANZNER, MICHAEL; KASPAR, JÖRG: Processing of silicon by Nd:YAG-lasers with harmonics generation. In: Proc. of SPIE Vol. 4637: *Photon Processing in Microelectronics and Photonics* (ICALEO 2002, 2002), S. 496-504. - ISBN 0-8194-4376-X
- [18] LEI, WEISHENG; HU, WENTAO; FU, QIANG: Micro-machining applications of green (second harmonic) solid state lasers in the electronics manufacturing industry. In: *ICALEO 2001* (2001), S. 1731-1736. - ISBN 0-912035-730
- [19] MICHL, PETER: *Beschriften mit Lasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1992. - ISBN 3-18-400990-4
- [20] O'MARA, WILLIAM C.; HERRING, ROBERT B.; HUNT, LEE PHILIP: *Handbook of semiconductor silicon technology*. New Jersey : Noyes Publications, 1990. - ISBN 0-8155-1237-6
- [21] PFLEGING, W.; SCHALLER, TH.: Mikromaterialbearbeitung durch spanabhebende und lasergestützte Verfahren. In: *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrgang 34 (2002), S. 21D-22D
- [22] PIKORZ, W.; SCHLÜTER, P.: Siliziumscheiben mit dem Festkörperlaser schneiden. In: *Laser-Praxis*, Juni (1991), S. LS48-LS50. - ISSN 0937-7069
- [23] RICHERZHAGEN, BERNOLD: Cool heat that cuts (laser wafer dicing). In: *European Semiconductor*, Bd. 23 (2001), Nr. 8, S. 89-90. - ISSN 0265-6027

-
- [24] RICHERZHAGEN, BERNOLD: The waterjet-guided laser in wafer cutting. In: *Future Fab International*, 06/99 (1999). URL: http://www.synova.ch/pdf/2000_Korea_Swit.pdf
- [25] POPRAWA, REINHARDT; TEBBEN, KARSTEN; ZWEYDINGER, PETER: Laseranwendungen in der Mikrotechnik. In: >>inno<< *Innovative Technik - Anwendungen aus Nordrhein-Westfalen : Lasertechnik ; Laser und Mikrosystemtechnik - industrielle Systemlösungen mit Licht*, 6. Jahrgang (2001), Nr. 18, S. 4-19
- [26] RÜHL, F.; TREUSCH, H. G.: *Die Bibliothek der Technik. Bd. 5 : Industrielaser : Einführung mit Anwendungsbeispielen*. Landsberg/Lech : moderne industrie, 1987. - ISBN 3-478-93005-7
- [27] STÜRMER, MARTIN: *Materialabtrag mit Nd:YAG-Lasern*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1995 (Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 352). - ISBN 3-18-335202-8/ ISSN 0178-9406
- [28] TREUSCH, HANS-GEORG (Bearb.): *Laser in der Materialbearbeitung. Bd. 7 : Abtragen, Bohren und Trennen mit Festkörperlasern*. Düsseldorf : VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1997. - ISBN 3-00-002233-3
- [29] TÖNSHOFF, H. K.; OSTENDORF, A.; WAGNER, T.: Structuring silicon with femtosecond lasers. In: Proc. of SPIE Vol. 4274: *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VI* (2001), S. 88-97. - ISBN 0-8194-3952-5
- [30] ULIERU, DUMITRU G.: The comparative analysis of silicon wafers micromachining versus nonconventional technology. In: Proc. of SPIE Vol. 4557: *Micromachining and Microfabrication Process Technology VII* (2001), S. 371-377. - ISBN 0-8194-4285-2
- [31] WAGNER, FRANK; RICHERZHAGEN, BERNOLD: Wasserspiele : Wasserstrahlgeführtes Laserlicht bearbeitet empfindliche Materialien. In: *Laser-Praxis*, Juni (2001), Nr. 2, S. 22-24. - ISSN 0937-7069
- [32] ZENGERLE, ROLAND: *Mikrosystemtechnik 2 : Aufbau- und Verbindungstechnik 1*. Freiburg, Universität Freiburg, Mikrosystemtechnik, Vorlesungsskript, 2002 [23]

- [33] ZENGERLE, ROLAND: *Mikrosystemtechnik 1 : 2. Materialien der Mikrosystemtechnik*. Freiburg, Universität Freiburg, Mikrosystemtechnik, Vorlesungsskript, 2002 / 2003 (2003-11-27)

Firmenveröffentlichungen

- [34] Fa. DISCO HI-TEC EUROPE:
diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:<http://www.discoeuropa.com/en/products/start.asp?lan=en&proid=2&proid1=2>
(2003-11-27)
- [35] Fa. Laser- und Medizin-Technologie Berlin:
diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:http://www.lmtb.de/lt/images/pdf_fuer_tabelle/angebotsbeispiele_pdf/mikroritze_n.pdf (2003-11-27)
- [36] Fa. SYNOVA SA: *A bright idea that puts the competition in the shade*; Comparison Water jet - Laser - Microjet®
URL:http://www.synova.ch/pdf/2000_Korea_Swit.pdf (2003-11-27)
- [37] Fa. SYNOVA SA: diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter:
URL:<http://www.synova.ch> (2003-11-27)
- [38] Fa. ALSI: diverse Herstellerinformationen/Produktdatenblätter
URL:<http://www.alsi-international.com/pages/basis.htm> (2003-11-27)

Mündliche Äußerungen/ Informationen aus email-Korrespondenz

- [39] HIEMANN, EGBERT: *Trennschleifen : Funktionsweise und Probleme des Wafersägens*. Technische Universität Dresden; Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, 2003-12-02

- [40] MIMIETZ, STEFFEN: Trennschleifen : *Schnittqualität beim Wafersägen*. INFINEON Technologies Dresden, 2004-01-21
- [41] MÖLLER, BERTHOLD: Trennschleifen : Informationen zum Wafersägen (Schneidgeschwindigkeit, Schnittfugenbreite, etc.). DISCO HI-TEC EUROPE Kirchheim b. München, 2003-08-29 und 2003-09-16

Normen

- [42] DIN EN ISO 9013:2002 (D) 09.02/07.03. *Thermisches Schneiden : Einteilung thermischer Schnitte: Geometrische Produktspezifikation und Qualität*
- [43] DIN 2310:1991 Teil 6 02.91. *Thermisches Schneiden - Einteilung, Verfahren*
- [44] DIN EN 12584 06.99/03.99. *Unregelmäßigkeiten an Brennschnitten, Laserstrahlschnitten und Plasmaschnitten - Terminologie*

Abbildungen/ Tabellen

- [45] RÖCKEN, HEINER: *Optoelektronische Bauelemente durch fokussierende Ionenprojektion : Nanostrukturierte weiße Silizium-Leuchtdioden für Raumtemperaturbetrieb*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie, Dissertation, 2002
- [46] SCHAUMBURG, HANNO (Hrsg.): *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik*. Bd. 2 : *Halbleiter*. Stuttgart : Teubner, 1991. – ISBN 3-519-06124-4
- [47] URL: <http://home.nikocity.de/schael/solar/tip3919.gif>

Anhang A Messergebnisse (tabellarisch)

Anhang A.1: Messwerte zur Untersuchung der Materialdickenabhängigkeit

Materialdicke d [μm]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V _{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μm]			
	variable Größe	Mittelwert	Standard-abw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt		Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleintr.	Strahlaustr.
223		96,8	5,2	0,517	0,028	36	20	2,1	437	180	237
326		241,0	4,3	0,2075	0,0037	49	17	2,8	480	235	270
525		1108	100	0,0451	0,0041	46	20	1,4	462	185	316

Materialdicke d [μm]	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
223	13,307
326	18,431
525	14,301

Anhang A.2: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Kristallorientierung

Kristallorient.	Schneidrichtung/ Orientierung [°]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V _{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μm]	
		variable Größe	Mittelwert	Standard-abw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt		Strahlaustritt	berechnete Größe
<100>/ <111>										
<111>	0	111,3	3,4	0,449	0,014	31	11	2,7	220	176
<111>	90	103,7	1,2	0,4823	0,0058	32	8	3,1	230	164
<111>	45	107,7	7,6	0,464	0,033	34	10	3,1	221	277
<111>	135	03,0	3,3	0,485	0,015	35	9	3,4	229	174
<100>	0	91,0	2,2	0,550	0,013	22	10	1,6	176	155
<100>	90	98,0	3,6	0,510	0,019	24	10	1,9	190	172
<100>	45	95,33	0,94	0,5245	0,0052	29	11	2,4	163	182
<100>	135	103,00	0,82	0,4854	0,0038	23	11	1,6	182	385

Kristallorient.	Strafpunkte SP []
<100>/<111>	berechnete Größe
<111>	5,279
<111>	7,166
<111>	6,780
<111>	8,521
<100>	1,807
<100>	2,435
<100>	3,186
<100>	1,903

Anhang A.3: Messwerte zur Untersuchung des Oberflächeneinflusses

Oberflächenbehandlung	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μ m]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μ m]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleneintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleneintritt	Strahlaustritt
geschliffen/geätzt		314	23	0,319	0,023	32	20	1,6	262	254
poliert		330	31	0,303	0,028	40	18	3,0	364	86

Oberflächenbehandlung	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
geschliffen/geätzt	3,813
poliert	11,630

Anhang A.4: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Polarisationsrichtung

Polarisationsrichtung	Schneidrichtung/Ablenkwinkel [°]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μ m]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μ m]	
		variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleneintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleneintritt
zirkular / linear	0	94	47	0,53	0,26	50	19	4,0	243	216
zirkular	90	85	42	0,59	0,29	36	18	2,4	275	216
zirkular	45	96	48	0,52	0,26	46	11	4,6	314	97
zirkular	135	84	42	0,60	0,30	39	17	2,9	283	239
linear	0	82	41	0,61	0,30	39	20	2,5	251	215
linear	90	56	27	0,90	0,44	30	19	1,4	253	227
linear	45	79	39	0,63	0,32	34	21	1,7	254	235
linear	135	62	31	0,80	0,40	29	16	1,7	230	229

Polarisationsrichtung	Strafpunkte SP []
zirkular / linear	berechnete Größe

zirkular	11,768
zirkular	5,519
zirkular	18,577
zirkular	7,454
linear	4,970
linear	2,959
linear	3,399
linear	2,729

Anhang A.5: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Laserleistung

Ausgangsleistung P [W]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V _{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μm]		
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleintritt	Strahlaustritt
3	111,2	2,5		0,450	0,010	49	26	3,1	340	159
10	51,00	0,63		0,980	0,012	72	61	1,5	630	326

Ausgangsleistung P [W]	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
3	10,959
10	28,650

Anhang A.6: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Pulswiederholfrequenz

Pulswiederholfrequenz f _{Rep} [kHz]	Ausgangsleistung P [W]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V _{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μm]	
		variable Größe	gemessene Größe	Mittelwert	Standardabweichg.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe
8,00	10,80	117,6	5,0	0,425	0,018	36	16	2,7	268	250
9,00	10,36	108,0	2,0	0,4630	0,0086	41	16	3,3	286	211
10,00	10,59	106,80	0,98	0,4682	0,0043	40	16	3,1	218	198
11,00	9,55	86,2	1,9	0,580	0,013	30	18	1,6	268	180
12,00	8,66	84,00	0,63	0,5952	0,0045	34	19	2,0	233	189
13,00	8,34	79,0	1,1	0,6329	0,0088	34	18	2,1	242	159
14,00	7,64	78,6	2,2	0,636	0,017	35	7	3,6	194	80
15,00	7,18	77,4	1,9	0,646	0,016	34	7	3,6	182	74

Pulswiederholfrequenz f _{Rep} [kHz]	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe

8	6,321
9	9,481
10	6,638
11	3,850
12	3,336
13	3,806
14	8,695
15	8,139

Anhang A.7: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Defokussierung

Defokussierung [mm]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μm]	
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt		Strahlaustritt	berechnete Größe
-0,200	-	-	-	-	51	30	2,9	340	179
-0,100	304,7	2,6	0,1641	0,0014	-	-	-	-	-
-0,050	291,7	6,6	0,1714	0,0039	-	-	-	-	-
0,000	240	11	0,2086	0,0093	50	26	3,3	342	156
0,050	225,3	1,7	0,2219	0,0017	-	-	-	-	-
0,100	225,3	1,2	0,2219	0,0012	-	-	-	-	-
0,150	219,7	1,2	0,2276	0,0013	-	-	-	-	-
0,200	222,7	2,6	0,2246	0,0026	45	24	2,9	284	163
0,250	230,3	5,4	0,2171	0,0051	-	-	-	-	-
0,300	229,3	3,7	0,2180	0,0035	-	-	-	-	-
0,350	237	13	0,211	0,012	-	-	-	-	-
0,400	260	11	0,1921	0,0083	38	22	2,2	257	163
0,500	277,3	4,8	0,1803	0,0031	-	-	-	-	-
0,600	254	13	0,1971	0,0098	38	19	2,6	244	165

Defokussierung [mm]	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
0,000	11,841
0,200	7,683
0,400	4,734
0,600	5,507

Anhang A.8: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Scangeschwindigkeit (Scannersteuerung)

Scangeschwindigkeit v_{scan} [mm/s]	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μ m]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μ m]	
	variable Größe	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahltritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahltritt
0,1	3,00	0,00	0,033	0,000	-	-	-	-	-
1	5,33	0,47	0,188	0,017	35	22	2	113	79
25	40,0	1,6	0,625	0,026	24	21	0,4	188	181
50	85,0	8,6	0,588	0,060	27	19	1,0	164	268
75	125,7	9,5	0,597	0,045	33	75	-5,4	173	285
100	183	19	0,547	0,058	30	69	-5,1	174	270
125	202	29	0,620	0,090	28	89	-7,8	153	434
150	197	20	0,763	0,078	31	87	-7,0	157	452
175	244	24	0,717	0,069	34	73	-5,0	183	421
200	246	23	0,813	0,077	32	77	-5,7	245	441
225	288	47	0,78	0,13	36	75	-4,9	325	438
250	315	41	0,79	0,10	36	78	-5,4	299	382
275	354	29	0,778	0,064	42	76	-4,3	205	442
300	358	38	0,837	0,090	34	75	-5,2	255	459

Scangeschwindigkeit v_{scan} [mm/s]	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
1	1,440
25	1,343
50	1,024
75	30,021
100	27,239
125	61,146
150	50,379
175	26,348
200	35,431
225	29,814
250	33,093
275	20,379
300	30,145

Anhang A.9: Messwerte zur Untersuchung im engeren Geschwindigkeitsfenster; $v_{scan} = (0,1-20)$ mm/s

Scangeschwindigkeit v_{scan} [mm/s] variable Größe	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]	
	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße
0,1	11,00	0,82	0,00909	0,00067
1	11,33	0,47	0,0882	0,0037
5	22,3	1,3	0,224	0,013
10	33,7	1,7	0,297	0,015
20	59,0	2,9	0,339	0,017

Anhang A.10: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Verfahrensgeschwindigkeit (Tischsteuerung)

Verfahrensgeschwindigkeit v_{tisch} [mm/s] variable Größe	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μ m]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μ m]	
	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleintritt	Strahlaustritt
0,17	3,67	0,47	0,0455	0,0058	36	26	1,4	187	155
0,33	4,00	0,00	0,0833	0,0000	-	-	-	-	-
0,50	4,00	0,00	0,1250	0,0000	-	-	-	-	-
0,67	3,67	0,47	0,182	0,023	-	-	-	-	-
0,83	3,67	0,47	0,227	0,029	36	25	1,5	194	132
1,67	5,00	0,00	0,3333	0,0000	39	28	1,4	218	141
3,33	7,33	0,47	0,455	0,029	-	-	-	-	-
5,00	11,00	0,00	0,4545	0,0000	39	26	1,8	231	171
6,67	15,00	0,00	0,4444	0,0000	-	-	-	-	-
8,33	17,67	0,47	0,472	0,013	35	21	1,9	231	174
16,67	31,33	0,47	0,5319	0,0080	38	21	2,3	273	188

Verfahrensgeschwindigkeit v_{tisch} [mm/s] variable Größe	Strafpunkte SP [] berechnete Größe
0,17	1,849
0,83	1,914
1,67	2,285
5,00	2,953
8,33	3,194
16,67	5,243

Anhang A.11: Messwerte zur Untersuchung des Einflusses der Gasatmosphäre

Gasatmosphäre	notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschwindigkeit V_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [μ m]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [μ m]	
	Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleintritt	Strahlaustritt
Luft	211	14	0,237	0,016	34	8	3,5	180	22
Argon	153	27	0,327	0,058	39	7	4,3	346	21
Helium	66	15	0,76	0,17	26	6	2,6	213	15

Vakuum	85	32	0,59	0,22	34	6	3,7	188	27
--------	----	----	------	------	----	---	-----	-----	----

Gasatmosphäre	Strafpunkte SP []
variable Größe	berechnete Größe
Luft	7,872
Argon	18,176
Helium	4,686
Vakuum	8,955

Anhang A.12: Minimale und maximale effektive Schneidgeschwindigkeiten

variierter Parameter		minimale effektive Schneidgeschwindigkeit $v_{\text{eff.min}}$ [mm/s]		maximale effektive Schneidgeschwindigkeit $v_{\text{eff.max}}$ [mm/s]	Geschwindigkeitsdifferenz ($v_{\text{eff.max}} - v_{\text{eff.min}}$) [mm/s]	zur Optimierung eingehender Parameter
Laserleistung P_{Laser} [W]	3 W	0,45	10 W	0,98	0,53	x
Pulsfrequenz f_{Rep} [kHz]	8 kHz	0,43	15 kHz	0,65	0,22	x
Polarisationsrichtung	zirkular, 45°	0,52	linear, 90°	0,90	0,38	x
Krisallorientierung	<111>, 0°	0,45	<100>, 0°	0,55	0,10	
Materialdicke d [µm]	525 µm	0,05	223 µm	0,52	0,47	x
Materialoberfläche	poliert	0,30	geschliffen, geätzt	0,32	0,02	
Fokusslage +/- z [mm]	-0,1 mm	0,16	0,15 mm	0,23	0,06	
Scangeschwindigkeit v_{scan} [mm/s]	Scanner/ Tisch, 0,1 mm/s	0,01	Scanner, 300 mm/s	0,84	0,83	x
Atmosphäre	Luft	0,24	Helium	0,76	0,52	x
Atmosphäre	Luft	0,24	Vakuum	0,59	0,35	x

Anhang A.13: Messwerte zur Untersuchung mit optimierten Parametern

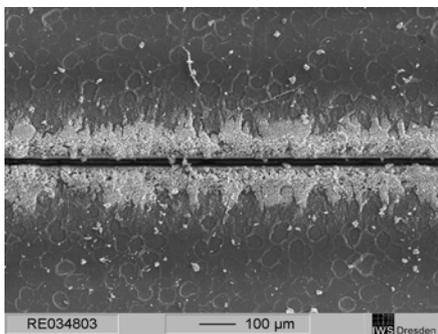
notwendige Anzahl Überfahrten n []		eff. Schneidgeschw. v_{eff} [mm/s]		Schnittfugenbreite w [µm]		Wandwinkel [°]	Ablagerungsausdehnung [µm]	
Mittelwert	Standardabw.	berechnete Größe	Fehlergröße	Strahleintritt	Strahlaustritt	berechnete Größe	Strahleintritt	Strahlaustritt
157	23	1,92	0,28	62	15	6,2	380	48

140,0	4,0	2,143	0,061	78	32	6,0	>405	81
-------	-----	-------	-------	----	----	-----	------	----

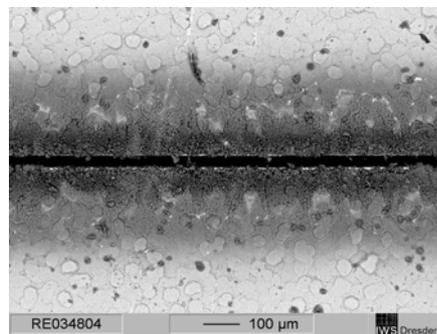
Anhang B Vergleich der Trennverfahren (tabellarisch)

Anhang C REM-Bilder

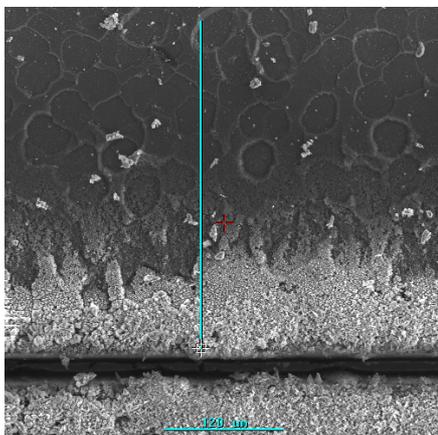
C.1 Bilder für Luft

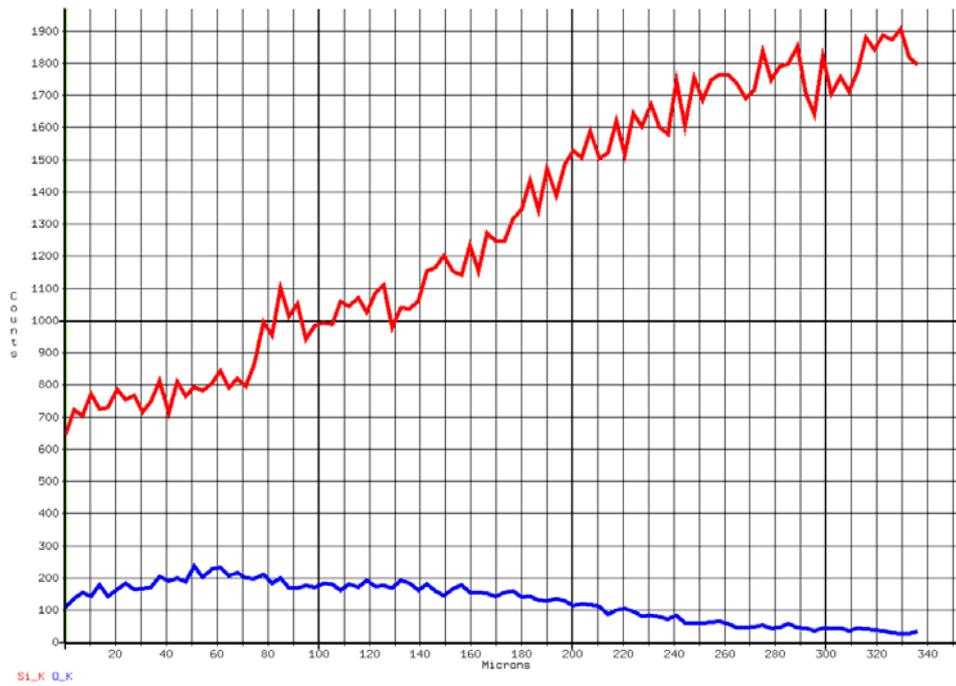


Anhang C.11: SE-Bild (Strahleintritt) an Luft

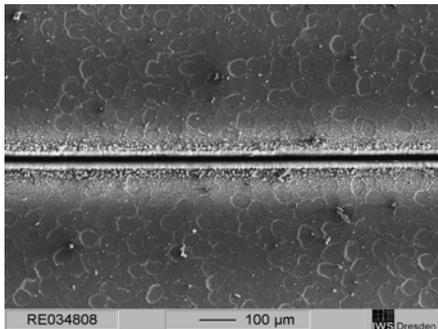


Anhang C.12: RE-Bild (Strahleintritt) an Luft

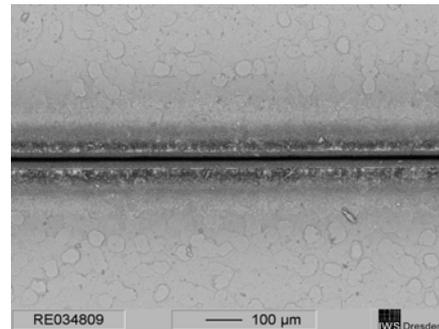




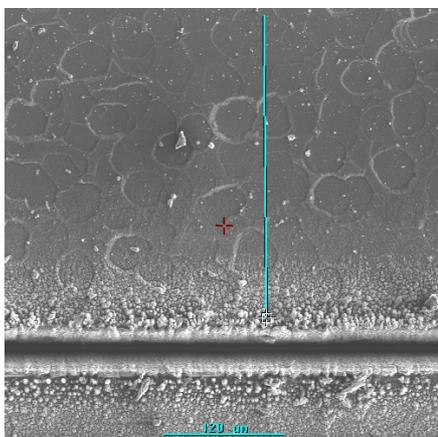
Anhang C.13: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) an Luft
C.2 Bilder für Argon

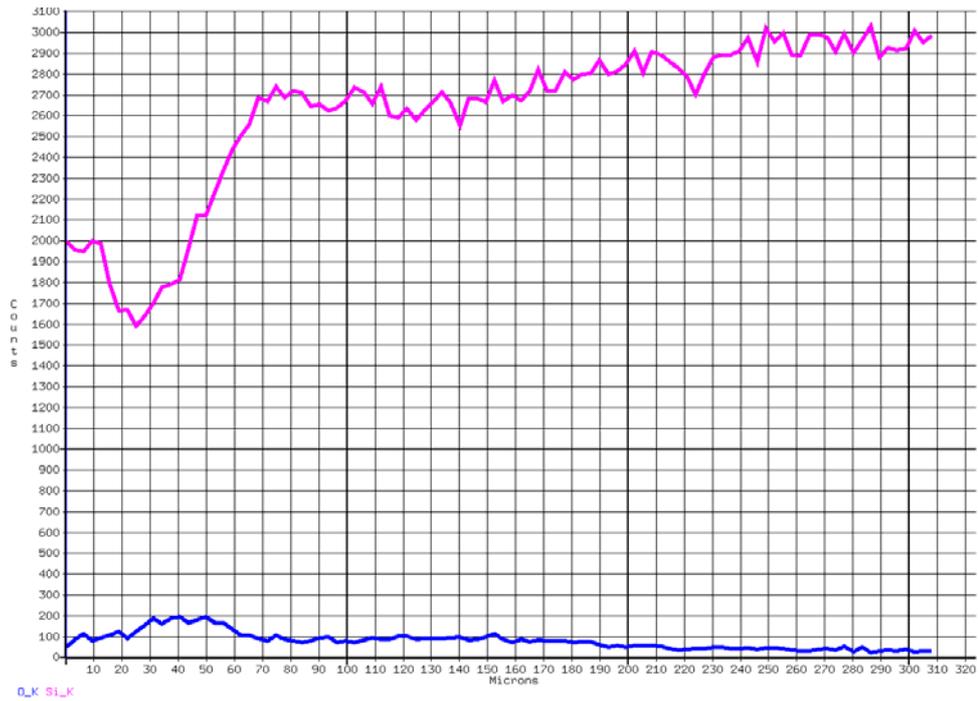


Anhang C.21: SE-Bild (Strahleintritt) in Argon

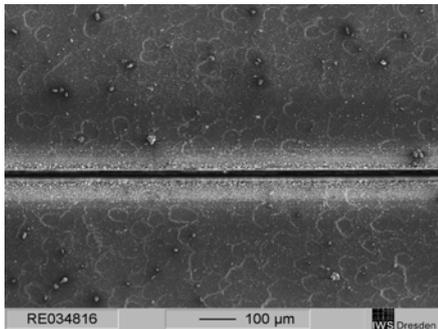


Anhang C.22: RE-Bild (Strahleintritt) in Argon

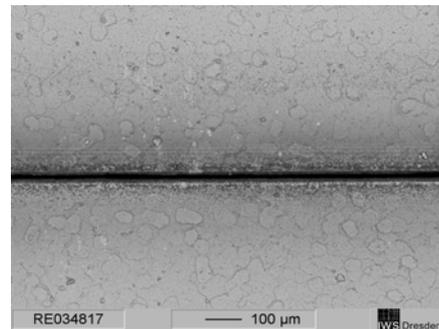




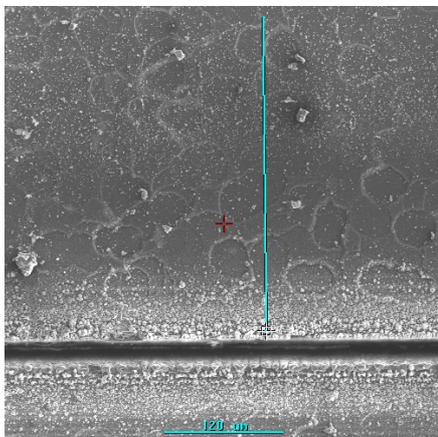
Anhang C.23: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Argon
C.3 Bilder für Helium

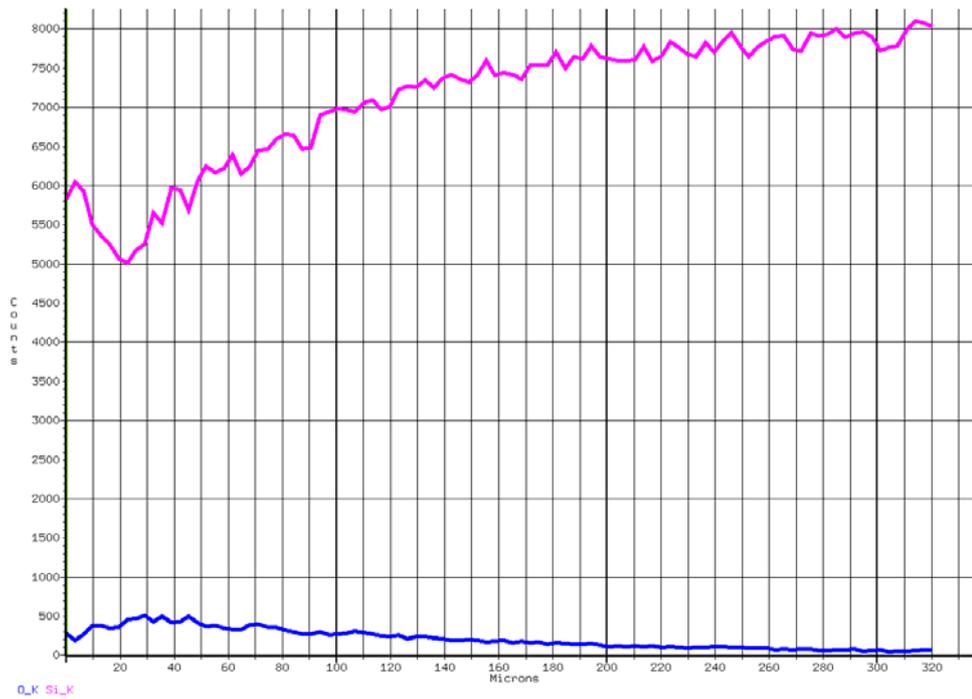


Anhang C.31: SE-Bild (Strahleintritt) in Helium

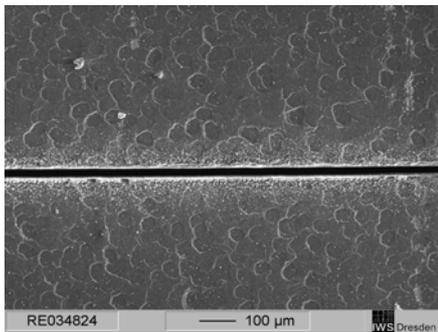


Anhang C.32: RE-Bild (Strahleintritt) in Helium

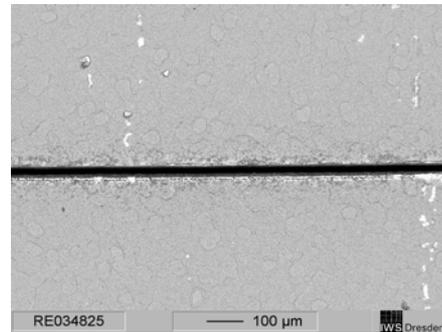




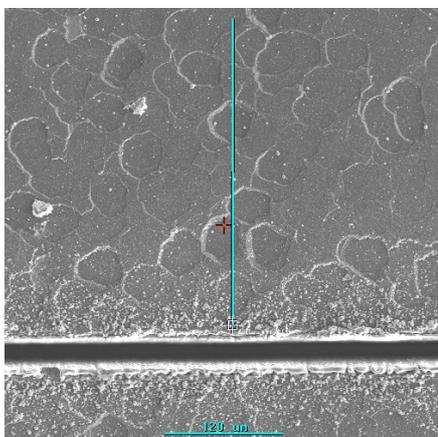
Anhang C.33: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Helium
C.4 Bilder für Vakuum

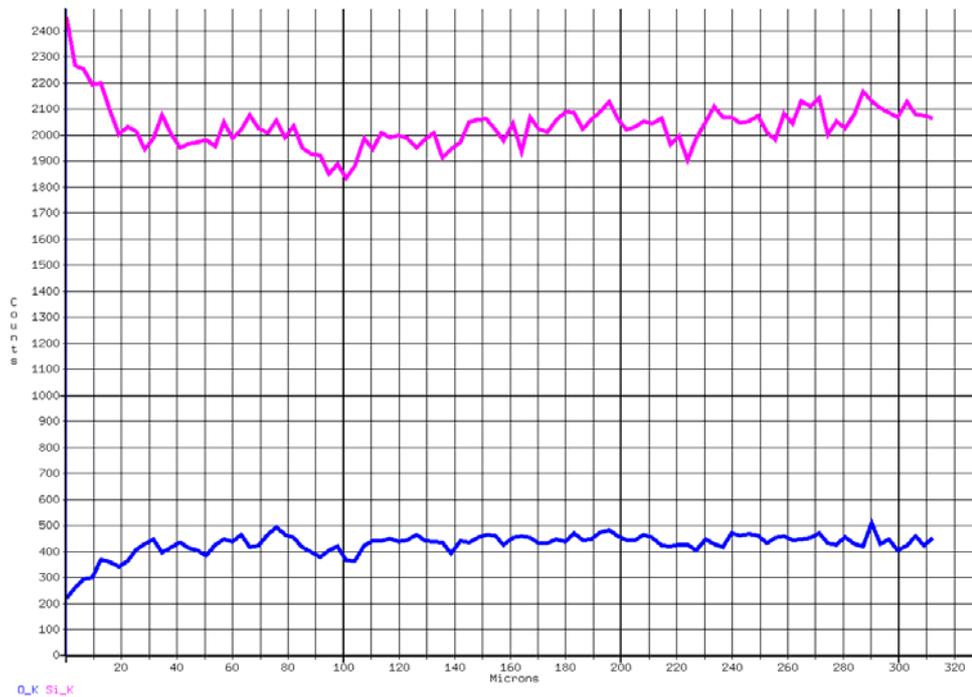


Anhang C.41: SE-Bild (Strahleintritt) in Vakuum



Anhang C.42: RE-Bild (Strahleintritt) in Vakuum





Anhang C.43: Linienanalyse (linescan) der Ablagerungen (Strahleintritt) in Vakuum

Anhang D Formeln zur Fehlerberechnung

Arithmetischer Mittelwert aus n Messwerten x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{D.1})$$

Empirische Standardabweichung (Streuung der Einzelmessung):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot t \quad (\text{D.2})$$

mit $t=2$ für 95%-ige Sicherheit

Gauß'sche Fehlerfortpflanzung (mittlerer quadratischer Fehler):

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k \right)^2} \quad (\text{D.3})$$

mit $y = f(x_1, \dots, x_k, \dots, x_m)$ und $\bar{y} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k, \dots, \bar{x}_m)$

Der Fehler für die effektive Schneidgeschwindigkeit nach Gleichung (11)

$$v_{eff.} = \frac{v_{scan}}{n} = v_{scan} \cdot n^{-1} \quad \text{ergab sich mit:}$$

$$\Delta v_{eff.} = \sqrt{\sum_{k=1}^1 \left(\frac{\partial v_{eff.}}{\partial n} \cdot \Delta n \right)^2} \quad \text{somit zu:}$$

$$\Delta v_{eff.} = \sqrt{\left(-v_{scan} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \Delta n \right)^2} \quad (D.4)$$

mit $n = x$ und $\Delta n = s$.

Die Ergebnisse wurden auf die Nachkommastellen des Fehlers (2 geltende Stellen im Fehler) aufgerundet.

Anhang E Programmquellcodes

E.1: Programm "square"

```
;program-name: square
;*****
; description:
;- user moves sample via joystick to desired place
;- user defines ([edge length [mm] and) feed rate (cutting speed/ velocity) [mm/min] and varies the
; number of passes [ ]
;- shutter opens for a defined time (cutting time per pass) while cutting routine starts
;- the program produces/performs a closed square shape with a defined edge length
;- after cutting the shutter keeps closed for a defined time (safety time) at the end of each movement
;- the program calculates the effective cutting speed [mm/s]
;- last used cutting parameters are stored in sqare_param.txt
;*****
;variables used:
;(V1 - edge length of square [mm])
;(V2 - feed rate (velocity/cutting speed) [mm/s]
;(V3 - number of passes [ ]
;(V4 - loop-index [ ]
;(V5 - actual number of passes (running variable)[ ]
;(V6 - effective cutting speed [mm/s]
;(V99 - asking about repetition
;(V100 - ENTER
;*****

:START ; program starts
PR ME ; program metric
ME DI " ; clear screen
GOTO C:\u500\prg\controlling\initialize_all.prg ; initialise all (plane
; rotation, scaling factor)

:MOVE
```

```

SLEW X Y
ME DI +V100 "Move stage via joystick to start position; press joystick button when you're done!
(ENTER)"
; moving to start position
; with joystick feed rate
SOFTWARE POSITION X Y
; position register (FPR) is
; written to absolute
; position register (APR)
; because working with
; joystick does NOT affect
; the APR
.*****
;
;value input:

ME FI (C:\u500\prg\cutting\square_param.txt,A) "Last used cutting parameters: "
; add/save last used
; cutting parameters to/in
; file square_param.txt

;ME DI +V1 "Enter edge length of square [mm] or press '0' for ENDing program! (ENTER)"
;ME FI (C:\u500\prg\cutting\square_param.txt,A) " edge length of square (V1): %.1fV1 [mm]"
;IF V1=0 THEN RETURN ; abort program

ME DI +V2 "Enter feed rate (velocity/cutting speed) [mm/min] or press '0' for ENDing program!
(ENTER)"

ME FI (C:\u500\prg\cutting\square_param.txt,A) " feed rate (V2): %.1fV2 [mm/min]"

IF V2=0 THEN RETURN ; abort program

F=1000 ; setting feed rate
; [1000 mm/min]
LINEAR x-2.000 ; the stage drives from
LINEAR y+2.000 ; the center point to the
; left corner

.*****
;
;cutting routine:

V5=0 ; initialise actual number
; of passes (running
; variable)
:SQUARE ; begin of the cutting
; routine

ME DI +V3 "Enter number of passes or press '0' for ENDing program! (ENTER)"
IF V3=0 THEN RETURN ; abort program

ME DI +V100 "Ready to go [process starts immediately] ...? [ENTER]"
; starts process/cutting
; procedure
G91 ; relative movement
V4=0 ; initialise loop-index
; loop-function with V4 as
; loop-index
; setting feed rate [V2 in
; mm/min]
; increment actual number
; LOOP
; F=V2
; V5=V5+1
ME DI "Actual number of passes: %.1fV5 [ ]"

```

```

; message to display:
; actual number of passes
; of passes (running
; variable)
FIRE PULSE 1000,0 TOGGLE ON
LINEAR y-4.000
; open shutter
; the stage drives in
; negative direction
; [-4.000 (V1) in mm]
LINEAR x+4.000
; the stage drives in
; positive direction
; [4.000 (V1) mm]
LINEAR y+4.000
LINEAR x-4.000
WA ON 0x8FFFB0
; wait until motion of axis
; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is
; finished
FIRE OFF
DWELL 200
; close shutter
; settle time: wait 200 ms
; at the end of line/
; between moves and keep
; shutter closed (safety
; time) otherwise cutting
; time isn't constant
; increment loop-index
V4=V4+1
IF V4<V3 GOTO :LOOP
; go to prompt LOOP again
ME DI +V99 "Do you want to repeat?: press '1' for REPetition or '0' for ENDing program [ENTER]"
IF V99=1 GOTO :SQUARE
; go to prompt SQUARE
; again
:CALCULATION
V6=(V2/60)/V5
; calculates the effective
; cutting speed [V6 in mm/s]
ME FI (C:\u500\prg\cutting\square_param.txt,A " actual number of passes (V5): %.1fV5 [ ]"
ME FI (C:\u500\prg\cutting\square_param.txt,A " effective cutting speed (V6): %.1fV6 [mm/s]"
F=1000
; setting feed rate
; [1000 mm/min]
LINEAR x+2
LINEAR y-2
; the stage drives back to
; the center point
EXIT
; program finishes (END of
; program)

```



```

; with joystick

SOFTWARE POSITION X Y ; feed rate position register
; (FPR) is written to absolute
; position register (APR)
; because working
; with joystick does
; NOT affect the APR

.*****
;
;value input:

ME FI (C:\u500\prg\cutting\lines_param.txt,A) "Last used cutting parameters: "
; add/save last used
; cutting parameters to/in
; file square_param.txt

;ME DI +V1 "Enter total line length [mm] or press '0' for ENDing program! (ENTER)"
;ME FI (C:\u500\prg\cutting\lines_param.txt,A) " total line length (V1): %.1fV1 [mm]"

IF V1=0 THEN RETURN ; abort program

ME DI +V2 "Enter feed rate (velocity/cutting speed) [mm/s] or press '0' for ENDing program! (ENTER)"
ME FI (C:\u500\prg\cutting\lines_param.txt,A) " feed rate (V2): %.1fV2 [mm/s]"

IF V2=0 THEN RETURN ; abort program
F=1000 ; setting feed rate
; [1000 mm/min]

LINEAR x-15.000 ; the stage drives
LINEAR y-2.000 ; from the center point
; to the start point

.*****
;
;cutting routine:

:LINES ; begin of the cutting routine

ME DI +V3 "Enter number of passes or press '0' for ENDing program! (ENTER)"
ME FI (C:\u500\prg\cutting\lines_param.txt,A) " number of passes (V3): %.1fV3 [ ]"

IF V3=0 THEN RETURN ; abort program

ME DI +V100 "Ready to go [process starts immediately] ...? [ENTER]"
; starts process/cutting
; procedure
; change of feed rate
; dimension [V2 in mm/s]
; -> [V2 in mm/min]

V2=V2*60 ; relative movement
; initialise loop-index

G91
V4=0

:LOOP1 ; loop-function with
; V4 as loop-index
F=V2 ; setting feed rate
; [V2 in mm/min]

ME DI "Cutting at feed rate %.1fV2 [mm/s], Actual number of passes: %.1fV4 [ ]"
; message to display:
; actual feed rate,

```

<pre> FIRE PULSE 1000,0 TOGGLE ON LINEAR x+30.000 WA ON 0x8FFF00 FIRE OFF DWELL 200 F=1000 LINEAR y-30.000 WA ON 0x8FFF00 V4=V4+1 IF V4<V3 GOTO :LOOP1 LINEAR y-2.000 V4=0 :LOOP2 F=V2 ME DI "Cutting at feed rate %.1fV2 [mm/s]" FIRE PULSE 1000,0 TOGGLE ON LINEAR x+30.000 WA ON 0x8FFF00 FIRE OFF DWELL 200 F=1000 LINEAR x-30.000 WA ON 0x8FFF00 V4=V4+1 IF V4<V3 GOTO :LOOP2 LINEAR y-2.000 V4=0 :LOOP3 F=V2 </pre>	<pre> ; actual number of passes ; open shutter ; the stage drives in positive ; direction [30.000 (V1) mm] ; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished ; close shutter ; settle time: wait 200 ms ; at the end of line/ ; between moves ; and keep shutter closed ; (safety time) otherwise ; cutting time isn't constant ; setting feed rate ; [1000 mm/min] ; the stage drives in ; negative direction ; [-30.000 (V1) in mm] ; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished ; increment loop-index ; go to prompt LOOP1 again ; the stage drives in negative ; direction [-2.000 mm] ; initialise loop-index ; loop-function with ; V4 as loop-index ; setting feed rate ; [V2 in mm/min] ; message to display: ; actual feed rate ; open shutter ; the stage drives in ; positive direction ; [30.000 (V1) mm] ; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished ; close shutter ; settle time: wait 200 ms ; at the end of line/ between ; moves ; and keep shutter closed ; (safety time) otherwise ; cutting time isn't constant ; setting feed rate ; [1000 mm/min] ; the stage drives in ; negative direction ; [-30.000 (V1) in mm] ; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished ; increment loop-index ; go to prompt LOOP1 again ; the stage drives in negative ; direction [-2.000 mm] ; initialise loop-index ; loop-function with V4 as ; loop-index ; setting feed rate </pre>
--	---

ME DI "Cutting at feed rate %.1fV2 [mm/s]"	; [V2 in mm/min] ; message to display: ; actual feed rate
FIRE PULSE 1000,0 TOGGLE ON	; open shutter
LINEAR x+30.000	; the stage drives in ; positive direction ; [30.000 (V1) mm]
WA ON 0x8FFF80	; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished
FIRE OFF	; close shutter
DWELL 200	; settle time: wait 200 ms ; at the end of line/ between ; moves ; and keep shutter closed ; (safety time) otherwise
F=1000	; cutting time isn't constant ; setting feed rate ; [1000 mm/min]
LINEAR x-30.000	; the stage drives in ; negative direction ; [-30.000 (V1) in mm]
WA ON 0x8FFF80	; wait until motion of axis ; 1, 2, 4 (bits 4 ... 7) is finished
V4=V4+1	; increment loop-index
IF V4<V3 GOTO :LOOP3	; go to prompt LOOP1 again
LINEAR x+15.000	; the stage drives
LINEAR y+2.000	; back to the center point
EXIT	; program finishes ; (END of program)

Anhang F Veröffentlichung

Influence of gas on cutting silicon with solid state laser

Udo Klotzbach, Stephanie Mälzer, Thomas Kuntze, Eckhard Beyer

Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS
Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany
E-mail: udo.klotzbach@iws.fhg.de

Abstract:

For more than three decades the tool "laser" is used for cutting various materials. Thanks to its high degree of flexibility the laser nowadays becomes a real competitor to existing silicon wafer separating methods in semiconductor industry like grinding with dicing saws. Presently, laser micro machining of silicon wafers is done by solid state lasers with 1064nm or 532nm, processing with 355nm is increasingly investigated [5]. Especially the influence of the gas atmosphere on cutting speed and achievable quality is to be discussed in this paper.

Keywords: laser cutting, silicon wafer dicing, gas atmosphere, diode-pumped solid-state lasers

1. Introduction

The goal of investigations was to determine influence of a certain atmosphere on cutting result. Object of determination was strategies for speed and quality optimisation. The investigation was done with a q-switched and frequency-tripled Nd:YAG laser (Gator UV from Lambda Physik AG). The speed and quality affecting factors are the formation and characteristics of plasma, reactions of the melted material with the environmental gas (e.g. oxidation) and removal of material (quantity and speed of particles) [1,2,4].

2. Experimental details

To achieve reproducible conditions for cutting experiments were performed in a vacuum chamber. The laser

beam was guided through a fused silica window and the focus was placed on material surface. Focus position was equal for all gases, since the differences of the gas' diffraction index are negligible and the depth of sharpness with used 100mm focal length lens was $\sim 100\mu\text{m}$.

As atmosphere gases argon and helium were used. The results in air served as reference. Also the influence of vacuum conditions was investigated. Therefore the chamber was evacuated down to a pressure of approximately 8 Pa (fine-vacuum range).

The exchange of atmosphere was done by flushing (threefold alternating evacuating to approximately 8 Pa and rinse with investigated gas). Subsequently, the chamber was filled with gas at slight positive pressure close to atmospheric pressure ($1,2 \cdot 10^5$ Pa) to prevent unwanted gas mixing.

Fivefold-expanded laser beam was guided with a scanhead in x- and y-direction and focused on working level with a 100mm F-theta lens. Achieved focus diameter was $\sim 30\mu\text{m}$.

The measurement of effective cutting speed v_{eff} was realized by determination of necessary number of passes n using a constant scanning speed of $v_{scan} = 50$ mm/s when cutting a closed square shape. Cutting speed computes itself from the formula

$$v_{eff} = \frac{v_{scan}}{n}$$

Subsequently, straight-line cuts were produced with the same cutting parameters in respective atmosphere and evaluated with optical inspection and surveying using optical microscopes. In the following table the most important parameters of laser, material and process are shown (tab.1).

Laser Parameters	Material Parameter	Process Parameter
Wavelength: 355 nm	Material: silicon (monocrystalline)	Focus position: +/- 0 mm
Average power: 3 W	Crystal orientation: <111>	Angel of incidence: 0 °
Repetition rate: 10 kHz	Material thickness: $(210 \pm 10)\mu\text{m}$	Scanning speed: 50 mm/s
Pulse duration: 15 ns	Material surface: grinded	Gas atmosphere: air, argon, helium, vacuum (8 Pa)
Polarisation: circular		Temperature: 20°C

tab. 1: Parameter list

3. Experimental results

3.1 Cutting speed

Cutting experiments were done on silicon wafer with $210\mu\text{m}$ thickness. A number of passes – depending on atmosphere are necessary to cut the silicon wafer (fig. 1a).

In relation to determined process time in air, with argon a reduction of $\sim 25\%$ was achieved. Helium reduced by even $\sim 65\%$. Under pre-vacuum conditions a reduction of process time of $\sim 55\%$ was reached compared to air. So pre-vacuum doesn't behave substantially worse in relation to helium.

In contrast effective speed behaves inversely proportional to the necessary number of passes n . According to the formula above the effective cutting speed is shown in fig. 1b. The maximum cutting speed was reached with 0,76 mm/s in helium atmosphere, which is three times faster than cutting in air.

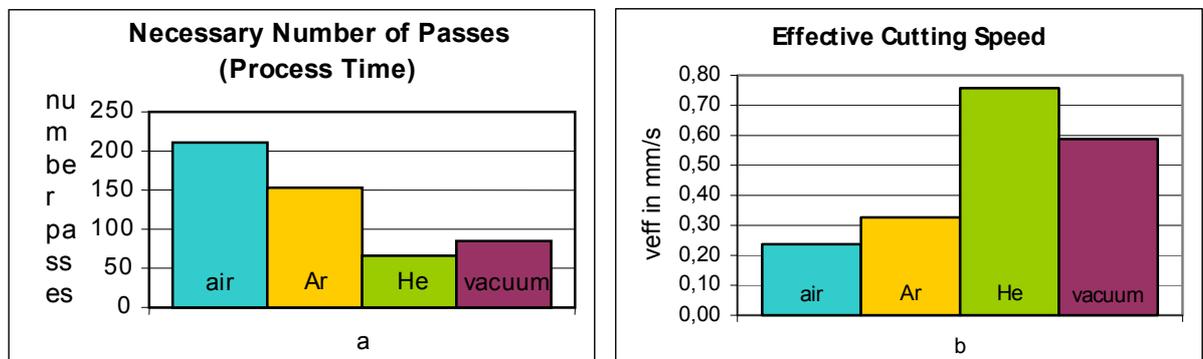


fig. 1: Dependence of
a) necessary number of passes and

b) effective cutting on gas atmosphere

3.2 Cut quality

Investigations on atmospheric influences on cut quality using 532nm-Nd:YAG-laser were already discussed in 1999 [1]. Similar results appeared in these investigations with 355nm.

In fig. 2 the illustrations of kerfs in silicon are shown for various atmospheres and beam entrance / exit on silicon surface. The measured values of the kerf widths are illustrated in the charts of fig. 3.

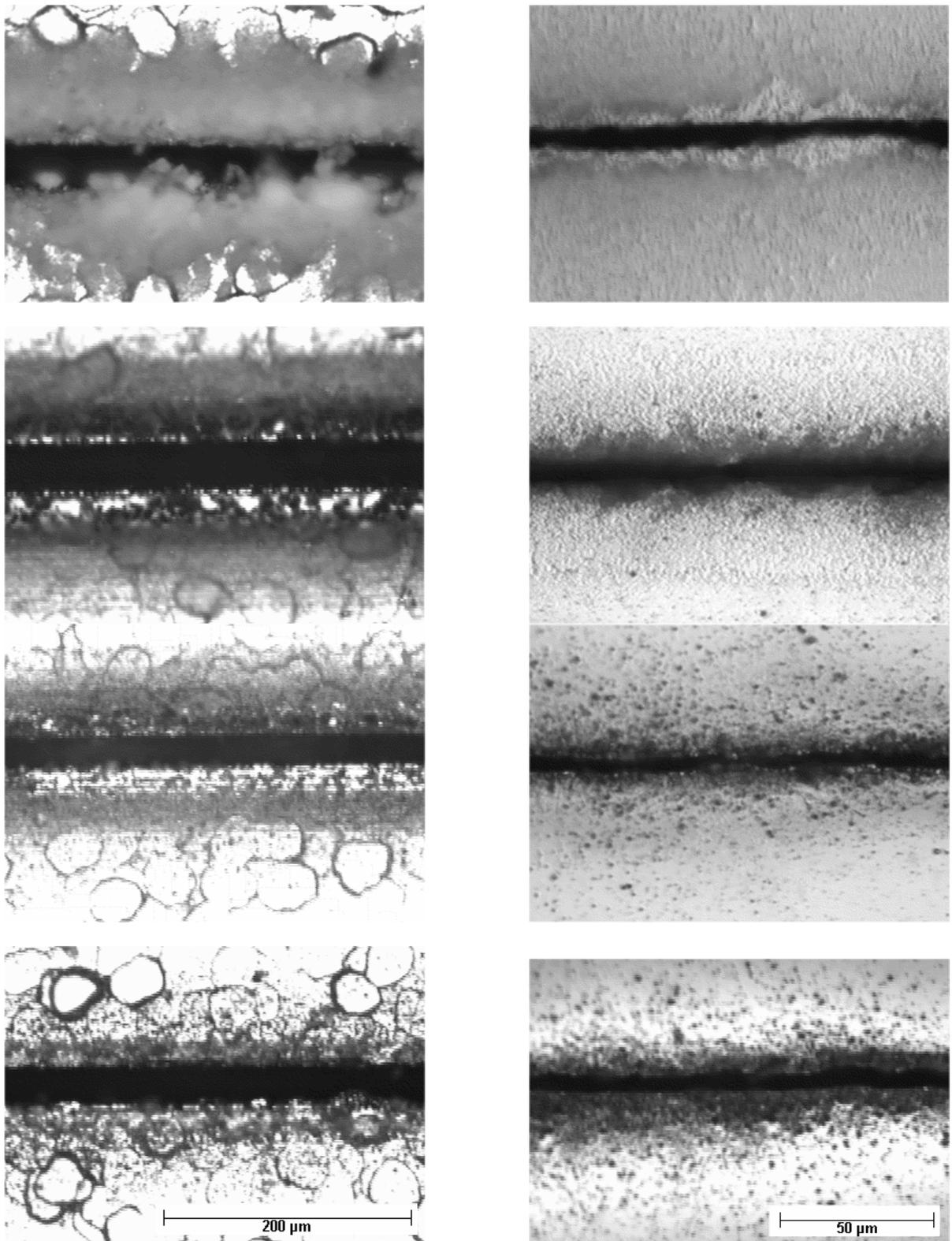


fig. 2: Dependence of cut quality on gas atmosphere (used gases top down: air, argon, helium, fine- vacuum). The kerfs of beam entrance (left) and beam exit (right) are compared.

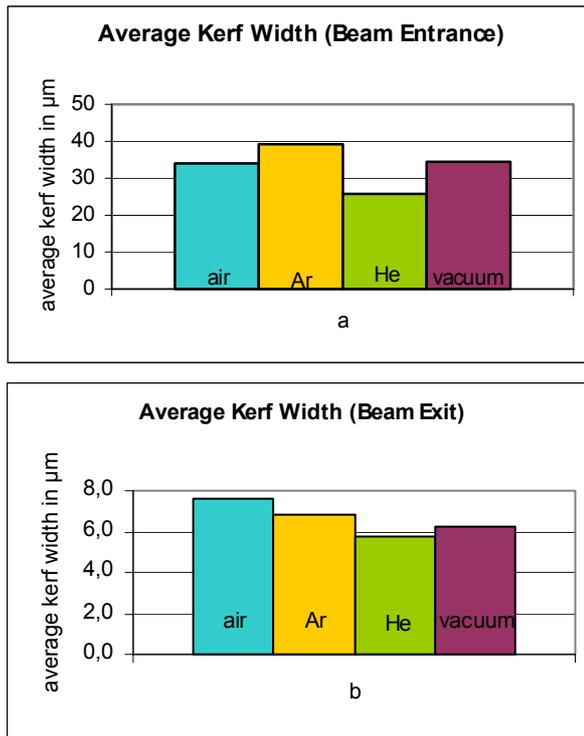


fig. 3: Dependence of the average kerf width
a) at beam entrance

b) at beam exit on the gas atmosphere

3.2.1 Results for cutting in air

Results in air serve primarily for comparison in order to enable an evaluation of quality in different atmospheres. Thereby the existence of air on standard conditions is assumed, which itself is essentially composed of two main parts nitrogen (~78 %) and oxygen (~21 %). As recognizable from brighter colour (white or transparent) and different granulation of the fusion deposits, oxygen essentially determines the cutting result in this case. Due to the chemical reaction between silicon and oxygen a formation of silicon oxide SiO_2 can be observed. The deposit includes homogeneous oxidized layer on both sides of kerf and strongly oxidized spherically solidified fusion particles which are isolated deposited on the surface. These melting pearls superpose itself at edges of kerfs and form an irregular but well located bulging with an average extension of nearly 180 µm. Therefore, no sharp edges could be achieved. Furthermore, the kerf was partially re-closed with silicon oxid (see beam exit in Fig.2). The average kerf is narrower (~34 µm) compared to the cutting results using argon or vacuum. It is to be assumed that formation of silicon oxid particles is even stronger when cutting in pure oxygen atmosphere.

3.2.2 Cutting results using argon

Probably most often used inert gas - in particular at the laser cutting of metals - is argon [1].

The major task of inert gases is prevention of oxidation of silicon melt during laser structuring. The oxidation effect depends on the purity of inert gas atmosphere. Due to missing oxygen almost all removed material is spread out as non-oxidized silicon dust rather than being concentrated as SiO_2 around kerf. Therefore, a stronger contamination of surrounding area on the wafer surface was observed. The debris, which is deposited as a very fine dust on both sides of the kerf, has a brownish colour (typical for non-oxidized silicon dust). Because of the larger quantity of removed material the maximum expansion of deposits of more than 350 µm was measured. Due to the high temperature of ablated and redeposited particles damages of surface can be result in further distant zones [1].

Contrary to the cutting result in air cutting edges were more sharply limited but show some defects at beam entrance. Furthermore the entrance kerf is clearly wider (~40 µm) compared to sample processed in air and in addition to samples processed in helium or vacuum.

3.2.3 Cutting results using helium

A further improvement of cut quality regarding deposits around the kerf can be achieved with helium as process atmosphere. The formation of silicon oxide is suppressed effectively with helium. The results are very sharp cutting edges with less defects and a thinner within a narrower field located dust film (extension ~210 µm). The in-

dication for lower material drive out is the clearly smaller kerf width ($\sim 26 \mu\text{m}$) compared to argon. Regarding the cutting quality, results in helium represented the best result.

3.2.4. Cutting results in vacuum

As expected, a decrease of the formation of silicon oxide occurred in fine vacuum, which particularly led to a change of appearance of deposits and their composition due to the missing oxygen. Thus the typical oxidic deposits were missing compared to results in air. The kerf showed less solidified melt and altogether less debris on wafer surface (extension $\sim 190 \mu\text{m}$). The cutting edges were relatively sharp and show only a little chunking. The entrance kerf ($\sim 34 \mu\text{m}$) is slightly wider than that with helium, but substantially narrower than in argon. With respect to a small debris amount, results in vacuum represented the best result.

4. Discussion

Thermal characteristics of gases are essential for cutting result. The gas has influence on heat transport and therefore on material cooling. In table 2 the most important characteristics (density ρ , specific thermal capacity c and heat conductivity α) of the used gases are given.

	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	$c / (\text{kJ/kg K})$	$\alpha / (\mu\text{W/cm K})$
Air	1,3	1,0	253
Argon	1,1	0,519	161
Helium	0,167	5,196	1482

tab. 2: Physical data of the used gases [1]

Compared to laser cutting of steel with wanted oxidation no increase of the cutting speed was achieved in silicon without torch cutting. Reason is that an oxide-layer not increases the absorption. So on one hand lowest cutting speed was determined in air. On other hand the cut quality is strongly interfered with bulge-like solidification of the silicon melt [1,3].

The increase of the debris when cutting in the inert gas argon let back to a higher drive out of the fusion from the kerf. It can be explained with the smaller thermal capacity and heat conductivity compared to air (50 % lower values). Thereby stronger evaporation of the melt in the kerf will be caused by a smaller cooling effect [1].

Helium has the highest coefficient of thermal conductivity of the used gases. Consequently cut samples in helium showed a smaller fusion drive out from the kerf than those processed with argon or nitrogen. The sharp clean edges argue for the high ionisation potential of the gas, which avoids a plasma formation to a large extent [1,4].

The most important effect during processing in vacuum is the strong dependence of the boiling point of silicon from pressure. With decrease of the evaporation temperature the quantity of evaporated silicon melt and so the erosion depth is rising. In addition, the missing of free heat convection in the vacuum works besides process promoting. Due to small electron densities at low ambient pressure (low gas density) plasma formation is worked against [1,4].

5. Conclusions

In the following table all measured values are collected:

	Air	Ar	He	Vacuum
$V_{\text{eff}} [\text{mm/s}]$	0,24	0,33	0,76	0,59
Average kerf width (entr.) [μm]	34,0	39,2	25,8	34,4
Average kerf width (exit) [μm]	7,6	6,8	5,8	6,2

tab. 3: Cutting results for investigated atmospheres

Regarding cutting speed best results were achieved using helium. Fewer deposits compared with another inert gas (e.g. argon) were stepped and the smallest kerf widths were observed. Generation of oxide was successfully avoided.

With the demand on a small debris amount the best result was obtained when processing in fine vacuum. Because of higher speed less deposition of the fusion particles was detected on the wafer surface. Formation of sili-

con dioxide was not found.

The main advantage of using oxygen as process gas is the fact that the melted deposits are more strictly local limited.

6. Outlook

Same investigations are interesting to be carried out with the POWER GATOR UV (Lambda Physik AG) which has the threefold of average output (10 W at 10kHz). It is expected that the higher pulse power leads to a bigger material removal in all gases and intensifies the effects observed.

References

- [1] S. Dauer: „Nd:YAG-Laserstrukturierung in der Silizium-Mikromechnik“ (Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik, Bd. 3) Shaker Verlag 1999, Aachen, Januar 1999
- [2] H. Hügel: “Strahlwerkzeug Laser - Eine Einführung” (Teubner-Studienbücher: Maschinenbau) B.G. Teubner 1992, Stuttgart, 1992
- [3] VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien: „Abtragen, Bohren, und Trennen mit Festkörperlasern“ (Handbuchreihe: Laser in der Materialbearbeitung, Bd. 7) VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996
- [4] VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien: „Präzise Optische Behandlung von Festkörpern - Oberflächenbearbeitung“ (Handbuchreihe: Laser in der Materialbearbeitung, Bd. 5) VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996
- [5] T. Corboline, E. C. Rea, Jr., C. Dunskey: “High Power UV Laser Machining of Silicon Wafers” Proceedings of SPIE Vol. 5063 Fourth International Symposium on Laser Precision Microfabrication, S. 495 - 500

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....

Datum

Unterschrift