

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

531

Carreño-Olejua, René

**Entwicklung eines Verfahrens zum Schneiden und
Schälen von Obst mit Hochdruckwasserstrahlen**

Dissertation

Kassel 2014

Universität Kassel
Fachgebiet Agrartechnik
Prof. Dr.sc.agr. Oliver Hensel

Entwicklung eines Verfahrens zum Schneiden und Schälen von Obst mit Hochdruckwasserstrahlen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften (**Dr.agr.**)

im Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
der Universität Kassel

vorgelegt von
Dipl.-Ing. **René Carreño-Olejua** M.Sc.
aus
Bucaramanga - Kolumbien

Witzenhausen, September 2013

Die vorliegende Arbeit wurde am 28.10.2013 vom Fachbereich für Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften angenommen.

Datum der Einreichung: 28.10.2013
Tag der mündlichen Prüfung: 12.12.2013

Haupberichter: Prof. Dr.sc.agr. Oliver Hensel
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker

Mündliche Prüfung: Prof. Dr.sc.agr. Oliver Hensel
Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker

Copyright 2013
Im Selbstverlag René Carreño

Bezugsquellen: HTWG Konstanz
Studiengang Verfahrenstechnik
Brauneggerstraße 55
78462 Konstanz

Universität Kassel
Fachgebiet Agrartechnik
Nordbahnhofstraße 1a
37213 Witzenhausen

Universidad Pontificia Bolivariana - Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Mecánica
Km7 vía a Piedecuenta
Bucaramanga - Kolumbien

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks, sowie jede Art photomechanischer Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

All rights reserved, including the right of reproduction of this book or portions thereof in any form whatsoever.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fakultät Maschinenbau an der Hochschule Konstanz im Rahmen eines durch das BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) finanzierten Projektes. Die Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz der Hochdruckwasserstrahltechnik und der Mechatronik im Bereich der Agrarwissenschaften und liefert als Ergebnis ein innovatives Verfahren zum Schälen von Agrarprodukten und zur Vorbereitung von Lebensmitteln.

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter dieser Fakultät konnte ich bei der Erstellung meiner Arbeit auf tiefgreifende Grundlagen und umfangreiche Ressourcen zurückgreifen.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel, Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker und Herrn Dr.-Ing. Albert Esper für die Anregung und die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Meißner für die Durchsicht der Arbeit.

Dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und der Päpstlichen Bolivariana Universität – Kolumbien (UPB) danke ich ganz herzlich für die finanzielle Unterstützung.

Frau Hannelore Baumeister, Eva-María David, besonders Anna-María Nuñez-Vega, Jennifer Thieme und Sandra Schröpfer danke ich ganz herzlich für die Hilfe bei der Überarbeitung meiner Vorlage in korrektes Schriftdeutsch.

Meinen Kollegen und Freunden des Bereiches Verfahrens- und Umwelttechnik, besonders Herrn Frank Vespermann, danke ich darüber hinaus für die tatkräftige und moralische Unterstützung und die zahlreichen wertvollen und interessanten Diskussionen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An dieser Stelle möchte ich natürlich auch Frau Karina Hanner und Frau Simona Weszelovszky für die Hilfe und Assistenz bei den Testdurchführungen danken.

Danken möchte ich auch meinem Sohn Simon Alejandro und dessen Verständnis für meine Abwesenheit während der ersten drei Lebensjahre.

Dedicado a:

mi hijo Simon Alejandro

mis Padres Santos y Alicia

mis Hermanos

a

*Gabriela, Catalina
y German Eduardo*

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Formelzeichen | XIII |
| 1 Einleitung und Problemstellung | 1 |
| 2 Literaturübersicht und Stand der Technik | 3 |
| 2.1 Klassische Methoden zum Schneiden und Schälen von Agrarprodukten . . . | 5 |
| 2.2 Alternative Schneidetechnologien | 6 |
| 2.3 Untersuchungen von Produktqualität und deren Abhängigkeit vom Schnei- deprozess | 8 |
| 2.4 Wasserstrahlschneiden in der Lebensmitteltechnik | 11 |
| 3 Technologische Grundlagen | 18 |
| 3.1 Stand der Technik des Wasserstrahlschneidens | 18 |
| 3.1.1 Schneidetechnologie | 18 |
| 3.1.2 Hochdruckwasserstrahlschneiden | 19 |
| 3.1.3 Physikalische Grundlagen der Wasserstrahltechnik | 22 |
| 3.1.4 Parameter, die das Strahlschneiden beeinflussen | 26 |
| 3.2 Verfahren zur Konturerkennung | 28 |
| 3.3 Bewertung der Schnittqualität anhand der Rauigkeit | 33 |
| 3.4 Bewertung der Farbe | 37 |
| 4 Aufgabenstellung | 39 |
| 5 Versuchsaufbau und -methodik | 41 |
| 5.1 Beschreibung der Anlage | 41 |
| 5.1.1 Komponenten des Hochdruckwasserstrahlsystems | 41 |
| 5.1.2 Ölhydraulisches System | 42 |
| 5.1.3 Hochdruckwasser-System | 43 |
| 5.1.4 Mechanischer Aufbau | 43 |
| 5.1.5 Robotergesteuerter Schnitt | 46 |
| 5.1.6 Halterung zur Aufnahme der Früchte | 46 |
| 5.1.7 Controller (DNC - CNC) | 47 |
| 5.1.8 Systemintegration | 47 |
| 5.1.9 Messsystem zur Oberflächenrauheitsbestimmung | 48 |
| 5.2 Versuchsdurchführung | 50 |
| 5.2.1 Versuche zur Bestimmung der Anlagenkennlinie | 50 |
| 5.2.2 Schneide- und Schälversuche | 50 |
| 5.2.3 Versuche zum Vergleich des Wasserstrahlschneidens mit klassischen Schneidverfahren | 51 |
| 5.3 Versuchsmethodik | 51 |
| 5.3.1 Versuche zur Bestimmung der Betriebsgrenzen der Anlage | 52 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.2 | Versuche mit reduzierten Rauheitsmessungen | 52 |
| 5.3.3 | Versuche im reduzierten Arbeitsbereich der Anlage | 54 |
| 5.3.4 | Versuche zur Untersuchung des Schälprozesses | 55 |
| 6 | Versuchsergebnisse | 57 |
| 6.1 | Ermittlung der Prozessparameter | 57 |
| 6.1.1 | Druck des Wasserstrahls | 57 |
| 6.1.2 | Volumenstrom | 58 |
| 6.1.3 | Leistungsaufnahme | 59 |
| 6.2 | Ergebnisse der Schnittversuche | 61 |
| 6.2.1 | Bestimmung der Betriebsgrenzen des Systems | 61 |
| 6.2.2 | Schnittversuche im gesamten Arbeitsbereich der Anlage | 64 |
| 6.2.3 | Schnittversuche im Bereich der Grenzkurve des Arbeitsbereiches . . | 68 |
| 6.3 | Ergebnisse der Schälversuche | 70 |
| 6.3.1 | Parameter des Schälverfahrens | 70 |
| 6.3.2 | Ergebnisse des Schälverfahrens | 71 |
| 6.4 | Vergleich unterschiedlicher Schnittverfahren | 74 |
| 6.4.1 | Rauheit | 74 |
| 6.4.2 | Farbe | 75 |
| 6.4.3 | Trocknung | 75 |
| 6.5 | Fazit | 79 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 81 |
| A | Untersuchungen zur Bestimmung der Schnittleistung des Systems unter Berücksichtigung der Oberflächenrauheit des geschnittenen Produkts | 85 |
| B | Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit | 112 |
| | Literaturverzeichnis | 128 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Überblick der Schneidetechnologienutzung in verschiedenen wirtschaftlichen Bereichen | 3 |
| 2.2 | Abrasivdisk und Bürstenstreifen zum Schälen von Kürbissen | 6 |
| 2.3 | Verteilung der Phenolkomponenten und oxydierenden Enzyme (Polyphenoloxidase und Peroxidase) in einer typischen Pflanzenzelle | 9 |
| 2.4 | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von geschnittenen Kartoffeln | 13 |
| 2.5 | Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von wasserstrahlgeschnittenen Karotten | 14 |
| 3.1 | Unterschiedliche Arbeitsweisen des Hochdruckwasserstrahlens | 21 |
| 3.2 | Anwendung der Wasserstrahltechnik mit ihrer typischen hydraulischen Leistung | 21 |
| 3.3 | Phasendiagramm des Wassers | 23 |
| 3.4 | Kompressibilitätsfaktor des Wassers bei $22^{\circ}C$ | 24 |
| 3.5 | Freistrahlschema | 25 |
| 3.6 | Schneideparameter für das Hochdruckwasserstrahlen | 27 |
| 3.7 | Erzeugung der Konturpunkte einer Frucht mittels der zweiten partiellen Ableitung einer Pixelmatrix | 30 |
| 3.8 | RGB-Raum mit entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen und Winkel-Übergangswerten | 31 |
| 3.9 | Punktevektor einer Fruchtkontur im Bezug zur Pixelmatrix des Kamerakoordinatensystems | 32 |
| 3.10 | Kenngrößen an Schnittflächen von abrasiv wasserstrahlgeschnittenen Werkstücken | 34 |
| 3.11 | Charakteristische Rauheitskurve einer Oberfläche nach DIN [1998] zur Ermittlung der Rautiefe (Rz) | 35 |
| 3.12 | CIE-Lab-Farbraum | 38 |
| 5.1 | Schema des Prinzips einer Anlage zum Hochdruckwasserstrahlschneiden | 42 |
| 5.2 | Druckübersetzer einer Kolbenhochdruckpumpe | 44 |
| 5.3 | Saphirdüsen | 44 |
| 5.4 | HDWS-Prüfstand zum Fruchtschälen und -schneiden | 45 |
| 5.5 | Koordinatensysteme von Kamera und Roboter | 47 |
| 5.6 | Kommunikationsschema des automatisierten Wasserstrahlschneidesystems | 48 |
| 5.7 | Digitale Streifenprojektion mit Mikrospiegelprojektoren (Messprinzip) | 49 |
| 5.8 | Schema der Erzeugung der Roboterbahnkurve zum Schälen. | 50 |
| 5.9 | Durchführung der Versuche für Apfelscheiben | 53 |
| 5.10 | Schema der Vorgehensweise zur Untersuchung der Oberflächenrauheit | 54 |
| 5.11 | Schema der Vorgehensweise zur Untersuchung eines Schälprozesses | 56 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.1 | Beispiel eines Drucksignales bei einer Systemkonfiguration von $\phi_D = 80\mu m$ als Düsendurchmesser und $f = 23Hz$ als Frequenz am Antriebsmotor . . . | 58 |
| 6.2 | Wasserverbrauch ohne und mit Betrachtung der Kompressibilität des Wassers | 59 |
| 6.3 | Wasservolumenverbrauch der gesamten Anlage, auf Atmosphärendruck bezogen | 60 |
| 6.4 | Leistung des Elektromotor-Antriebs vs. Druck der gesamten Anlage | 60 |
| 6.5 | Druck des Systems als Funktion der Frequenz | 61 |
| 6.6 | Wasserstrahlschnitt eines Apfels mit Wasserstrahleinstellungen im Übergangsbereich | 62 |
| 6.7 | Übergangslinie in der Isobarenkarte zur Unterscheidung von „optimalen“ und „nicht optimalen“ Schnittparametern | 63 |
| 6.8 | Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit. Musterabbildung der im Anhang A dargestellten Ergebnisse. | 64 |
| 6.9 | Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und des Drucks auf die Oberflächenrauheit, Düsendurchmesser von $130\mu m$ und ein Druck von 900 und 1400bar | 65 |
| 6.10 | Oberflächenrauheit als Funktion des Druckes für einen Düsendurchmesser von $80\mu m$ und $100\mu m$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 26\frac{mm}{s}$. | 65 |
| 6.11 | Einfluss des Strahlabstands auf die Oberflächenrauheit | 66 |
| 6.12 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$; $p = (800, 900, 1000, 1300)bar$; $D = (10\ 15)mm$; $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 69 |
| 6.13 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$; $p = (670, 800, 900, 1050, 1300)bar$; $D = (10\ 15)mm$; $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 70 |
| 6.14 | Ablenkung des Wasserstrahls | 71 |
| 6.15 | Schälschnitt einer Melone mit einem $130\mu m$ Durchmesser-Wasserstrahl . . | 73 |
| 6.16 | Analyse der Oberflächenrauheit von mit drei unterschiedlichen Werkzeugen geschnittenen Apfelscheiben | 74 |
| 6.17 | CIE-Lab-Farbanalyse der drei in Abbildung 6.16 dargestellten Schnittverfahren | 76 |
| 6.18 | Farbveränderung durch Trocknung von Apfelscheiben | 77 |
| 6.19 | Hydraulische Leistung des Wasserstrahls. | 79 |
| A.1 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 800bar$ | 86 |
| A.2 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 1000bar$ | 87 |
| A.3 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 1200bar$ | 88 |
| A.4 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 1600bar$ | 89 |
| A.5 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 2400bar$ | 90 |
| A.6 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $p = 2600bar$ | 91 |
| A.7 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 80\mu m$ und $v = 2\frac{mm}{s}$ im gesamten Druckbereich | 92 |
| A.8 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 100\mu m$ und $p = 900bar$ | 93 |
| A.9 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 100\mu m$ und $p = 1100bar$ | 94 |
| A.10 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 100\mu m$ und $p = 1400bar$ | 95 |
| A.11 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 100\mu m$ und $p = 2000bar$ | 96 |
| A.12 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 100\mu m$ und $v = 2\frac{mm}{s}$ im gesamten Druckbereich | 97 |
| A.13 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 130\mu m$ und $p = 900bar$ | 98 |
| A.14 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 130\mu m$ und $p = 1100bar$ | 99 |
| A.15 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 130\mu m$ und $p = 1400bar$ | 100 |
| A.16 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 130\mu m$ und $p = 2000bar$ | 101 |

| | | |
|------|---|-----|
| A.17 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 130\mu m$ und $v = 2\frac{mm}{s}$ im gesamten Druckbereich | 102 |
| A.18 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 150\mu m$ und $p = 900bar$ | 103 |
| A.19 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 150\mu m$ und $p = 1100bar$ | 104 |
| A.20 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 150\mu m$ und $p = 1400bar$ | 105 |
| A.21 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 150\mu m$ und $p = 2000bar$ | 106 |
| A.22 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 150\mu m$ und $v = 2\frac{mm}{s}$ im gesamten Druckbereich | 107 |
| A.23 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 180\mu m$ und $p = 1300bar$ | 108 |
| A.24 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 180\mu m$ und $p = 1700bar$ | 109 |
| A.25 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 180\mu m$ und $p = 2000bar$ | 110 |
| A.26 | Schnittergebnisse mit $\phi_D = 180\mu m$ und $v = 2\frac{mm}{s}$ im gesamten Druckbereich | 111 |
| | | |
| B.1 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$, $p = 800bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 112 |
| B.2 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$, $p = 900bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 113 |
| B.3 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$, $p = 1000bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 113 |
| B.4 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$, $p = 1300bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 114 |
| B.5 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 80\mu m$; $p = (800, 900, 1000, 1300)bar$; $D = (10\ 15)mm$; $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 115 |
| B.6 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$, $p = 670bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 116 |
| B.7 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$, $p = 800$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 117 |
| B.8 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$, $p = 900bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 117 |
| B.9 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$, $p = 1050bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 118 |
| B.10 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$, $p = 1300bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 118 |
| B.11 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 100\mu m$; $p = (670, 800, 900, 1050, 1300)bar$; $D = (10\ 15)mm$; $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 119 |
| B.12 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$, $p = 600bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 120 |
| B.13 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$, $p = 750bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 120 |
| B.14 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$, $p = 850bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 121 |
| B.15 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$, $p = 1050bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 121 |
| B.16 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$, $p = 1300bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 122 |
| B.17 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 130\mu m$; $p = (600, 750, 850, 1050, 1300)bar$; $D = (10\ 15)mm$; $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 123 |
| B.18 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m$, $p = 600bar$, $D = (10\ 15)mm$, $v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 124 |

| | | |
|------|---|-----|
| B.19 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m, p = 750bar, D = (10$ $15)mm, v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 125 |
| B.20 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m, p = 800bar, D = (10$ $15)mm, v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 125 |
| B.21 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m, p = 1050bar, D =$ $(10\ 15)mm, v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 126 |
| B.22 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m, p = 1300bar, D =$ $(10\ 15)mm, v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 126 |
| B.23 | Ergebnisse für eine Systemkonfiguration: $\phi_D = 150\mu m; p = (600, 750, 800,$ $1050, 1300)bar; D = (10\ 15)mm; v = (19\ 26\ 32)\frac{mm}{s}$ | 127 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Einsatz des Wasserstrahlschneidens in der Lebensmitteltechnik und den Agrarwissenschaften. Zusammenfassung | 17 |
| 3.1 | Hauptgruppen des Fertigungsverfahrens | 18 |
| 3.2 | Unterteilung der Hauptgruppe 3 „Trennen“ des Fertigungsverfahrens . . . | 19 |
| 3.3 | Klassifizierung der Strahlen nach Anwendung und Zweck | 20 |
| 3.4 | Einsatz von Strahlen innerhalb der Hauptgruppen der Norm DIN [2003a] . | 20 |
| 3.5 | Longitudinalwerte des Wasserstrahls | 26 |
| 3.6 | Schneideparameter eines Hochdruckwasserstrahlverfahrens | 28 |
| 3.7 | Schnittqualitätswerte | 36 |
| 3.8 | Linienrauheitsparameter | 36 |
| 5.1 | Technische Daten des Hochdruckwasserstrahlsystems (Pumpe, ölhydraulischer Antrieb und Schneidkopf) | 43 |
| 5.2 | Konfigurationsparameter zur Untersuchung des Arbeitsbereichs | 52 |
| 5.3 | Untersuchungsblockbildung zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit unter Beachtung der Oberflächenrauheit | 53 |
| 5.4 | Parametermatrix für die Untersuchung der Oberflächenrauheit | 54 |
| 5.5 | Parametermatrix für die Untersuchung der Schnitttiefe | 56 |
| 6.1 | Lage der Betriebsgrenze der Anlage $p = f(\phi_D)$ | 62 |
| 6.2 | Generelle Auswirkung der Schneideparameter auf die Variablen der Oberfläche | 67 |
| 6.3 | Parametermatrix für die Untersuchung der Oberflächenrauheit in 6.2.2 herausgefundenen Parametern | 68 |
| 6.4 | Ergebnisse zur Untersuchung der Schnitttiefe ($H_s[mm]$) einer mit einem $100\mu m$, $130\mu m$ und $150\mu m$ Durchmesser-Wasserstrahl geschnittenen Melone (Schnittverlauf <i>Fruchtfleisch – Schale</i>). H_{s_k} geometrisch aus der Fruchtform berechnete Größe, siehe Abbildung 5.11 | 72 |
| A.1 | Zuordnung der Bilder zu den Prozessparametern | 85 |

Formelzeichen

| Zeichen | Einheit | Größe |
|------------|-----------------|---|
| $A_1; A_2$ | mm^2 | Querschnittfläche Eingang bzw. Ausgang der Düse |
| B_{W_s} | mm | Breite des Werkstücks |
| D | mm | Strahlabstand |
| G_w | [1] | Grauwert eines Pixels |
| H_a | GPa | Härte der abrasiven Partikel |
| H_b | μm | Schnittbreite |
| H_g | GPa | Härtegrad des Werkstücks |
| H_s | mm | Schnitttiefe |
| H_{S_k} | mm | Kalkulierte Schnitttiefe eines Schälstücks |
| H_{W_s} | mm | Höhe des Werkstücks |
| L | m | charakteristische Länge des Gegenstandes |
| L_{W_s} | mm | Länge des Werkstücks |
| M | mm | Messbereich zur Bestimmung von u und α |
| P_m | W | Elektrische Antriebsleistung |
| P_{hyd} | W | Hydraulische Leistung |
| Q | $\frac{l}{min}$ | Volumenstrom |
| R_a | μm | Arithmetischer Mittelrauwert |
| R_q | μm | Quadratischer Mittelrauwert |
| R_R | μm | Restflächenrauheit |

| Zeichen | Einheit | Größe |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|
| R_S | μm | Schnittflächenrauheit |
| R_y | μm | Maximale Höhe |
| R_z | μm | Rautiefe |
| S | mm | Werkstückdicke |
| S_a | μm | Oberflächenrauwert |
| S_n | [1] | Anzahl der Schnitte (Schälprozess) |
| b_G, h_G | mm | Gratbreite, Grathöhe |
| b_o | mm | Breite der „strahlbeeinflussten Zone“ |
| d_a | μm | Durchmesser der abrasiven Partikel |
| d_f | mm | Fokussierdurchmesser |
| e | mm | Dicke der Schale |
| f_n | Hz | Nominalfrequenz am Antriebsmotor |
| h_R | mm | Restflächenhöhe |
| $\frac{h_R}{S}$ | [1] | Restflächenanteil |
| h_S | mm | Glattschnitt |
| $\frac{h_S}{S}$ | [1] | Glattschnittanteil |
| l_f | mm | Fokussierlänge |
| \dot{m}_a | $\frac{kg}{s}$ | Massenstrom des Abrasivstoffs |
| \dot{m}_w | $\frac{kg}{s}$ | Wasserdurchfluss |
| n | [1] | Schnittnummer |
| n_s | $\frac{1}{min}$ | Nominalwinkelgeschwindigkeit |
| n_{ws} | [1] | Anzahl der Schnitte (Werkstück) |

| Zeichen | Einheit | Größe |
|---------------------|------------------|--|
| p | bar | Wasserdruck |
| p_k | — | Punktvektor (x_k, y_k) eines Pixels im Kamerakoordinatensystem |
| p_r | — | Punktvektor (x_r, y_r, z_r) eines Pixels im Roboterkoordinatensystem |
| r_E | mm | Kantenradius (Strahleintrittseite) |
| u | rad | Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz |
| v | $\frac{mm}{s}$ | Vorschubgeschwindigkeit |
| v_s | $\frac{m}{s}$ | Wasserstrahlgeschwindigkeit |
| <hr/> | | |
| α | rad | Flankenwinkel |
| α_w | $grad$ | Wasserstrahlimpaktwinkel |
| β_B | rad | Winkel zwischen RGB-Vektorbetrag und B-Achse |
| β_n | rad | Kalkulierte Winkel zum Schälstück |
| κ_k | [1] | Schnürungsfaktor |
| ϕ_D | μm | Düsendurchmesser |
| ρ | $\frac{KG}{m^3}$ | Charakteristische Dichte des Fluides |
| ϕ_f | mm | Durchmesser einer Frucht (in der Mitte gemessen) |
| ξ_{RG} | rad | Winkel zwischen RGB-Vektorbetrag und RG-Ebene |
| μ | $\frac{Ns}{m^2}$ | Dynamische Viskosität |
| λ und μ | — | Lamé-Viskositäts-Konstanten |
| ζ | mm | Schnittkorrekturfaktor |

Abkürzungen

| | |
|--------------|---|
| CCD | Charge-coupled Device |
| CIE | Commission internationale de l'éclairage – International Commission on Illumination |
| CIE-L.a.b. | CIE-L.a.b.-Farbmodells nach DIN 6174 |
| DMDTM | Digital Micro Mirror Devices |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United States |
| FDA | Food and Drug Administration |
| FEA | Finite Elemente Analyse |
| HDWZ | Hochdruckwasserzylinder |
| KP1 bzw. KP2 | Kolbenpumpe 1 u. 2 stehen hier für den entsprechenden Druckübersetzer |
| MAP | Modified Atmosphere Packaging |
| PV | Pneumatisches Ventil |
| RGB | Rot, Grün und Blau Anteile eines Farbbildes |
| RMS | Root Mean Square |
| SK | Schneidekopf |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| USDA | United States Department of Agriculture |
| WHO | World Health Organization |

1 Einleitung und Problemstellung

Agrarprodukte können nur selten direkt, ohne weitere Verarbeitung, genutzt werden. In der Regel müssen sie nach der Ernte oder vor dem Verbrauch mechanisch verarbeitet werden durch Schneiden, Schälen, Mahlen oder ähnliche Verfahren. Die mechanische Verarbeitung dient auch der Vorbereitung anderer Prozessschritte, wie der Konservierung. Obst und Gemüse fällt saisonal an und bildet das volle Aroma nur aus, wenn es reif geerntet wird. Im reifen Zustand ist jedoch die Wasseraktivität sehr hoch ($a_w \approx 1$) und die Textur weniger stabil, was die Haltbarkeit stark einschränkt und den Transport erschwert. Der Vorgang der Konservierung durch Trocknung wird erheblich erleichtert, wenn das Produkt zuvor in eine möglichst gleichmäßige optimale Form gebracht wird. Mit dem Schneiden werden Fruchtteile oder -partikel hergestellt, deren Form und Größe den Trocknungsprozess unterstützen. Beispiele für Schneidewerkzeuge im Bereich der Lebensmittelverarbeitung sind Salatschneidemaschinen und Hobelmesser zur Herstellung von Scheiben oder Stiften verschiedener Produkte (z.B. Pommes Frites). Sie haben im Laufe ihrer Entwicklung allesamt eine hohe Schneideeffizienz erreicht.

Einige Früchte können nur nach Entfernen der Schale weiterverarbeitet werden. Das Schälen erfolgt durch mechanisches Entfernen der außenliegenden Fruchtteile im freien Schnitt, beispielsweise in einer Schältrömmel, oder mit definiertem Schnitt, der in der Regel von Hand ausgeführt wird. Beide Verfahren bergen erhebliche Nachteile: In keinem der Verfahren wird die tatsächliche Anatomie des Produktes berücksichtigt, daher sind die Materialverluste erheblich. Das Schneiden von Hand mit ständig wiederverwendeten Klingen ist mit großen Nachteilen im Bereich der Hygiene verbunden. Für die Qualitäts- und Hygienesicherung ist das Verarbeitungsverfahren jedoch eine wesentliche Einflussgröße und bestimmt die Güte von Agrarprodukten. Ein Großteil der Qualitätsverluste ist eine direkte Folge der inadäquaten Bearbeitung [Arpaia u. a., 2004]. Die Arbeitsumgebung beeinflusst die mikrobiologische Qualität des Prozesses entscheidend [McGlynn u. a., 2003, Merle, 1993]. Diese Probleme sind bei Früchten und Produkten tropischen Ursprungs noch größer, da dort das Arbeitsumfeld, insbesondere in Bezug auf Hygiene, schlechter ist.

Zur Abhilfe dieser Probleme ist daher ein Schneideverfahren zu entwickeln, welches die Anatomie der Produkte berücksichtigt, und die hygienischen Nachteile handgeführter Schnitte mit Klingen vermeidet. Eine weitere Forderung an das Verfahren ist, dass es möglichst hoch automatisierbar ist, sodass Eingriffe in den Prozess durch Bedienpersonal minimiert und bestenfalls vermieden werden können.

Aus diesen Bedingungen sind folgende Forderungen an ein neues Schneide- und Schälverfahren abzuleiten: Die Anatomie der Produkte muss aufgenommen werden und in einer für die Steuerung des Schnittes geeigneten Weise aufbereitet werden. Weiterhin muss der Schnitt automatisiert erfolgen, um Eingriffe in den Prozess zu vermeiden. Und letztlich ist ein Schneideverfahren einzusetzen, bei welchem keine kontinuierlich benutzte Klinge zum Einsatz kommt, damit die entstehenden Schnittflächen nicht kontaminiert werden können.

Die bisher eingesetzten Schneidverfahren können diese Forderungen nur teilweise mit erheblichen anderen Nachteilen erfüllen. So wurde das Schneiden mit Laserstrahlen, welches aus der Produktionstechnik im Maschinenbau bekannt ist, zum Schneiden von Obst eingesetzt. Wegen des an den Schnittflächen auftretenden Wärmeeintrags hat sich dieses Verfahren jedoch nicht durchgesetzt. Das Schneiden mit durch Ultraschall beaufschlagten Klingen ist – insbesondere im Bereich tiefgefrorener Produkte – verbreitet, jedoch kann der Schnitt bei diesen Systemen nicht individuell gestaltet werden. Die Schnittkontur entspricht bei diesen Verfahren immer der Form der Klinge. Weiterhin wird die Klinge kontinuierlich eingesetzt, sodass die Kontamination der Schnittflächen wahrscheinlich ist.

Daher wird untersucht, ob die oben aufgestellten Forderungen mit einem digital gesteuerten Schnitt mit einem Hochdruckwasserstrahl erfüllt werden können. Der Wasserstrahl verhindert die Kontamination der Schnittfläche, die digitale Steuerung des Schnittes, entsprechend der optisch erfassten Anatomie der Produkte, ermöglicht die Minimierung der Schnittverluste beim Schälen.

2 Literaturübersicht und Stand der Technik

Dieses Kapitel beinhaltet eine Einführung in die Schneidetechnologie in klassischen Nachernteprozessen und den Einfluss des Schneideprozesses auf die Produktqualität.

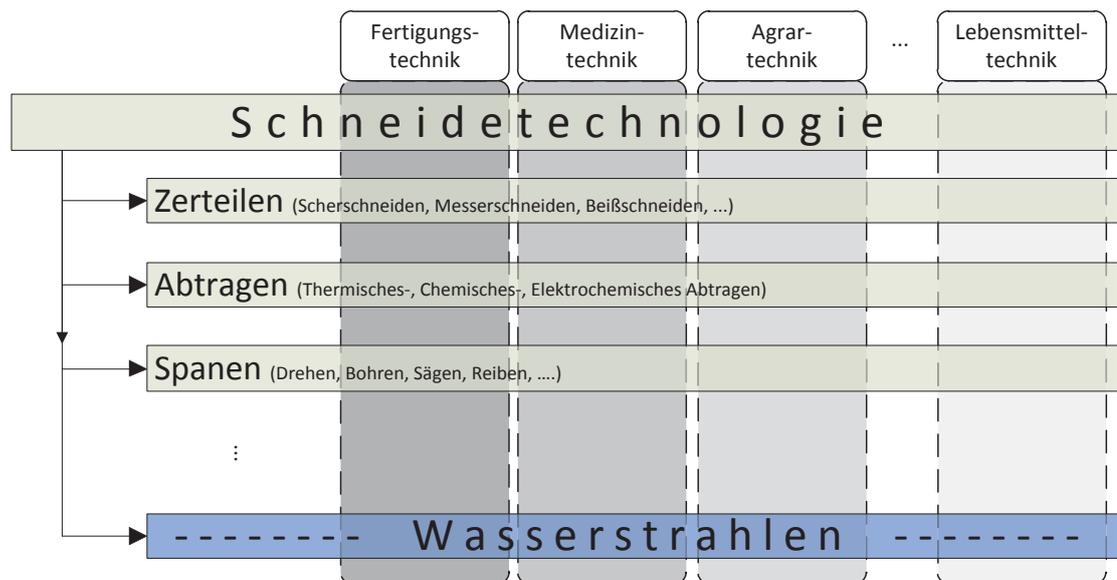


Abbildung 2.1: Überblick der Schneidetechnologienutzung in verschiedenen wirtschaftlichen Bereichen

Typische Anwendungsbereiche der Schneidetechnologie sind beispielsweise die Herstellung von Maschinen und Werkzeugen für die Verbundwerkstoff- und Eisenindustrie, die Medizin im Bereich der Chirurgie und Zahnheilkunde, für Ernteverfahren in der Agrartechnik sowie für die Lebensmittelindustrie und besonders die Nacherntetechnik. Die Abbildung 2.1 zeigt in allgemeiner Form den Einsatz der Schneidetechnologie in verschiedenen Bereichen.

Die Hochdruckwasserstrahltechnik hat sich in den vergangenen Jahren in verschiedenen Bereichen der Industrie fest etabliert. Wasserstrahlen wurde bereits früh im Bergbau zum Abbau von Bodenschätzen sowie bei der Verarbeitung von Gesteinen, Kunststoffen usw. eingesetzt. Die Nutzung der Wasserstrahltechnik ist seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt [Louis, 1991].

Das Reinigen ist vielleicht das älteste Einsatzgebiet des Wasserstrahls. Das Erodieren mit Hilfe des Wasserstrahls wurde bei Erdbauarbeiten als Spülung verwendet. Erst mit dem Einsatz von Pumpenantrieben wie Dampfmaschinen, Verbrennungsmotoren etc. und mit der Entwicklung von Wasserpumpen bis zu 200bar in den dreißiger Jahren wurde das

Reinigen, Lösen und Entschichten mit Hilfe von Wasserstrahlen möglich.

Nach der Entwicklung der nötigen Pumpentechnik wurde der Wasserstrahl mit Verwendung von höheren Drücken zum Trennen von weichen Materialien wie z.B. Papier, Windeln etc. als Schneidverfahren eingesetzt. Die Anwendung der Wasserstrahlschneidetechnik in der Fertigungstechnik nahm in den sechziger Jahren durch die Entwicklung neuer Materialien zur Herstellung der Bestandteile von Hochdruckanlagen, wie z.B. ölhdraulischen Pumpen als Druckerzeuger, Hochdruckrohrleitungen etc. stark zu. Seit den achtziger Jahren wird der Wasserstrahl außerdem als Partikelbeschleuniger in der abrasiven Wasserstrahlschneidetechnik eingesetzt [Shimizu, 1999].

Nach Klocke u. König [2007] sind Vorteile der Hochdruckwasserstrahlschneidverfahren im Vergleich zu klassischen Schneidverfahren unter anderen geringere mechanische Belastung des Werkstücks, keine thermische Beeinflussung der Randzone, keine oder geringere Bildung von Schneidstaub oder Gasen und schmale Schnittfugen etc. Natürlich hat das Verfahren auch einige Nachteile. Je nach Schneidparameter und hier insbesondere Quergeschwindigkeit (Schnittgeschwindigkeit) und dem Wasserdruck, wird der Wasserstrahl in entsprechenden Proportionen durch den Kontakt mit dem zu schneidenden Objekt abgelenkt. Dieser Effekt führt zur Abschrägung der Schnittkante und im unteren Bereich der Schnittkante zu einer Erhöhung des Rauheitswertes. Beide Fehler können vermieden werden, indem die Schnittparameter im Bezug auf die Materialeigenschaften optimiert werden und die 3D-Steuerungsschnittsysteme zum Einsatz kommen.

Bisher hat bei der Nutzung der Wasserstrahltechnik im Bereich der Fertigungstechnik besonders der Einsatz der abrasiven Wasserstrahltechnik sehr stark zugenommen. Vor allem beim Trennen von höherfesten und sprödharten Stoffen, sowie bei Verbundwerkstoffen, ist diese Technik von Vorteil. Aber auch in anderen Forschungsbereichen wird die Wasserstrahltechnik eingesetzt. Beispielsweise nutzte Bingmann u. a. [2000] in der Neuropsychologie Wasserstrahlen im Druckbereich von 400bar bis 600bar , um Scheiben aus Gewebe zu schneiden und deren Verletzung mit anderen Schnittmethoden zu vergleichen. In der Lebensmitteltechnik arbeiteten Becker u. Gray [1992] bei der Herstellung von Kartoffelscheiben in der Evaluierung der Schnittmethode mit Wasserstrahl.

Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die Nutzung der Wasserstrahltechnik in der Lebensmitteltechnik (siehe Abschnitt 2.4) und in der Landwirtschaft interessant. Ligocki [2005] und Brüser [2008] bearbeiteten in ihren Dissertationen das Thema der Wasserstrahltechnik in der Landwirtschaft. Sie untersuchten die Schneidparameter beim Zuckerrübenschneiden, um die entsprechenden Ergebnisse im Bereich der Erntetechnik zur Nutzung der Wasserstrahltechnik in Landmaschinen einzusetzen. Die Auswertungen von Ligocki verwendete Brüser, um die Wasserstrahlschneidparameter zu optimieren. Auf dem Effekt des Wassertropfenimpakts basierend, entwickelte Brüser eine Einrichtung, um den Wasserstrahl zu manipulieren und das Phänomen in Form von Wassermengenpaketen zu emulieren.

2.1 Klassische Methoden zum Schneiden und Schälen von Agrarprodukten

Die wirtschaftlichste Methode zum Schälen von schalenhaltigem Obst und Gemüse ist das mechanische Schälen in Schältrömmeln, -walzen oder Messerschälmaschinen, dem ein Waschgang nachgeschaltet ist, bei welchem die Schale vollständig abgetragen wird [Schuchmann u. Schuchmann, 2005]. Diese Art des Schälen ist bei unregelmäßiger Rohware wie z.B. bei Wurzel- und Knollengemüse oder Tomaten jedoch stark verlustbehaftet. Hier wird auf Dampf- oder Laugenschälen zurückgegriffen. Bei letzterer Methode wird die Ware in einem 0.5% bis 20% Natronlaugenbad bei 50°C bis 100°C für 2min bis 14min eingeweicht, die Schale trocken abgerieben und mit 2-prozentiger Zitronensäure neutralisiert. Oder man beaufschlagt die Rohware für 30 bis 90 Sekunden mit Dampf (4bar bis 15bar), was eine Schädigung der äußeren Zellschichten bewirkt und dazu führt, dass sich die Schale beim anschließenden Entspannen lockert und sich schließlich ablöst.

In die gewünschte Form, wie z.B. Wellenscheiben, Würfel, Stifte oder Streifen werden die Früchte mit kontinuierlichen Schneidemaschinen mit stationären oder rotierenden Scheiben- oder Rundmessern gebracht.

Bei allen vorgestellten Schälmethode werden jedoch die Zellwände der Agrarprodukte zerstört, was zu einem erhöhten mikrobiellen Wachstum und enzymatischen Veränderungen führt [Wiley, 1994]. Ahvenainen u. a. [1998] geben als ideale Schälmethode das Schälen von Hand an, da dieses sehr schonend ist. Kartoffeln, die mit einer Schälmaschine geschält wurden, müssen mit einem Bräunungsinhibitor behandelt werden, wohingegen bei handgeschälten Kartoffeln ein Abwaschen mit Wasser ausreicht um die enzymatische Bräunung zu verhindern [Schuchmann u. Schuchmann, 2005].

Zitrusfrüchte können bereits mit kommerziell erhältlichen Enzympräparaten geschält werden, die zusätzlich in der Lage sind, die weiße Innenhaut zu hydrolysieren. Suutarinen u. a. [2003] untersuchten daher das Potential des enzymatischen Schälen von Gemüse. Dazu wurde die Schale von Kartoffeln, Karotten, Steckrüben und Zwiebeln mittels Skalpell vorsichtig entfernt, gefriergetrocknet und mit Enzymen behandelt. Sie stellten fest, dass die eingesetzte Enzymmischung für Kartoffeln und Steckrüben nicht geeignet war, die enzymatische Behandlung von Zwiebeln und Karotten jedoch zu einer Erleichterung des anschließenden Schälen von Hand führte. Toker u. Bayindirli [2003] untersuchten die Möglichkeiten des enzymatischen Schälen für Aprikosen, Nektarinen und Pfirsichen und setzten dafür vier verschiedene kommerziell erhältliche Enzymlösungen ein. Mit drei der vier eingesetzten Enzymlösungen konnten bei relativ hohen Temperaturen gute Schälergebnisse erreicht werden, wobei es keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Fruchtarten gab. Die Autoren sehen die Hauptvorteile der von ihnen angewendeten Methode darin, dass das Endprodukt qualitativ hochwertig ist und durch das schonende Schälen die Struktur sowie die Eigenschaften des Ausgangsprodukts beibehält.

Emadi u. a. [2007] entwickelten eine neuartige Methode zum Abrasivschälen von Kürbissen. Hierzu schnitten sie aus festem Schaumstoff verschiedene Scheiben und beklebten diese mit Abrasivpartikeln verschiedener Korngrößen (Siehe Abbildung 2.2 (links)). Die Abrasivdisks könnten für den industriellen Einsatz von großem Nutzen sein, da sie sich dem stark unförmigen Kürbis optimal anpassen, wodurch Verluste minimiert werden und Kürbisse in kurzer Zeit geschält werden können.

In einer weiteren Studie entwickelten und simulierten Emadi u. a. [2008a,b] eine eben-

falls neuartige Methode zum mechanischen Schälen von Kürbissen, die sie „Abrasive-Cutter Bürste“ (Siehe Abbildung 2.2 (rechts)) nennen.

Hauptzweck dieser Entwicklung ist abermals, die geometrisch unregelmäßigen Kürbisse



Abbildung 2.2: Abrasivdisk und Bürstenstreifen zum Schälen von Kürbissen [Emadi u. a., 2008b, 2007]

auf mechanischem Wege möglichst verlustfrei zu schälen. Diese neue Methode ist den bisherigen Methoden, bezüglich Produktionsrate und Schälen mit geringeren Verlusten, noch überlegen.

Auf die bisherigen Entwicklungen der Wasserstrahlschneidetechnik im Bereich der Lebensmitteltechnik wird im Abschnitt 2.4 eingegangen.

2.2 Alternative Schneidetechnologien

Neben den Fortschritten der Materialwissenschaft sind neue Technologien im Bereich der Lebensmittelverarbeitung entwickelt worden. Zu dem Begriff „neue Technologien“ zählen Wasserstrahl, Laser und Ultraschall, die zu neuartigen Schneideverfahren im genannten Bereich zählen, obwohl sie bereits aus der Metallverarbeitung bekannt sind.

Das Verfahren des Wasserstrahls wurde in den siebziger Jahren als kommerzielle Schneidemethode in der Metallverarbeitung entwickelt. Bis dahin waren Plasma und Laser die führenden Schneideverfahren auf dem Markt. Der Einsatz von Wasserstrahlen zeigte große Vorteile gegenüber den anderen Verfahren, da im Gegensatz zu diesen keine Verformung von Metallen verursacht wird und die geschnittenen Metalle keine Wärmebehandlung erfordern. Die wesentlichen Vorteile des Wasserstrahlverfahrens sind daher vor allem das Präzisionsschneiden, das zu einer Verringerung von Materialausschuss führt, die Vermeidung von thermischen Verformungen, der mögliche Einsatz in explosionsgefährdeten Zonen, in denen Wärme nur bedingt eingesetzt werden kann und die Verwendbarkeit bei brennbaren Materialien, sowie die Nutzbarkeit sowohl bei dicken, als auch bei dünnen Materialien.

Obwohl Laser und Plasma mit entsprechender Ausrüstung, wie z.B. Roboter-Armen o.Ä., relativ gute und präzise Schnitte produzieren, unterscheiden sie sich stark gegenüber der Wasserstrahltechnologie, da sich aufgrund der steigenden Temperatur auf der geschnittenen Oberfläche die Metallstruktur verändert.

Im Bereich der Lebensmittel werden die genannten Schnitteinflüsse des Wasserstrahlens zum Vorteil. Da Lebensmittel organische Materialien sind, würde die thermische Erwärmung der Oberfläche Schäden verursachen.

Choi u. Li [2006] berichten über die Interaktion von Laserschnitten bei Käse in der Produktion von dünnen Käsescheiben mit komplexen Formen. Die Untersuchungen von Schnitttiefe und Einwirkungszeit wurden mit UV-Laser-Photoablation (Schneiderverfahren unter niedriger Temperatur) mit der als optimal befundenen 266nm Wellenlänge bei Bohr- und Schneiderverfahren durchgeführt. Choi u. Li [2006] untersuchten CAD-gesteuerte Laserschnitte von dünnen Käseschichten mit Wellenlängen von 355nm und 266nm . Sie fanden heraus, dass die Tiefe des Schnittes mit einer Wellenlänge von 355nm deutlich niedriger ist als die mit einer Wellenlänge von 266nm . Bei gleicher Energie ($2500\frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$) und Geschwindigkeit ($0,01\frac{\text{mm}}{\text{s}}$) wurde bei 350nm Wellenlänge eine Schnitttiefe von 2mm und für 266nm Wellenlänge eine Schnitttiefe von 4mm erreicht. Es zeigt sich, dass Schäden bei einer Wellenlänge von 355nm auftreten, dagegen wurde eine hohe Schnittqualität bei einer Wellenlänge von 266nm erreicht.

Andere Anwendungsmöglichkeiten der Laser-Ablation in der Nahrungsmitteltechnologie wurden von Panchev u. a. [2011] dargestellt. Panchev u. a. verwendeten CO_2 -Laser mit einer Wellenlänge von $10,6\mu\text{m}$. Mithilfe von Fotografien wiesen sie die Wirkung auf der Oberfläche verschiedener landwirtschaftlicher Produkte wie Zitronen, Orangen, rotem und grünem Chili sowie roten Zwiebeln und Knoblauch nach. Die Aufnahmen zeigen, dass die Laser-Schnitte in sehr dünnen Schichten stattfinden. Die Autoren schließen daraus, dass ein CO_2 -Laser als Werkzeug zur Oberflächenbehandlung (Schälen) von landwirtschaftlichen Produkten verwendet werden kann. Hierfür wäre die Entwicklung eines Handhabungs-Systems notwendig. Eine Untersuchung der genauen Schnitttiefe gibt es jedoch nicht.

Bei der von Panchev u. a. durchgeführten Untersuchung von Gemüse und Obst konnte herausgefunden werden, dass der Laser zum Schneiden und Ablösen verwendet werden kann. Diese Ergebnisse sind besonders interessant, weil sie die organoleptischen Eigenschaften erhalten. Deswegen kann diese Technik in Zusammenhang mit der Extraktion von Aromen und Substanzen für die chemische Industrie eingesetzt werden.

Im Bereich des Ultraschallschneidens lassen sich eine Reihe von Untersuchungen in Bezug auf die Temperatureffekte finden. Demnach wird Ultraschall sehr oft bei der Lebensmittelvorbereitung benutzt, um präzise und saubere Schnitte zu erzeugen. Thermische Effekte an der Oberfläche, z.B. wenn hohe Temperaturen ($55^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$) über einen erheblichen Zeitraum gehalten werden, können zu Nekrosen führen. Die Erwärmung beim Ultraschall-Verfahren entsteht aufgrund von Gasblasen, die sich aus der Schnittflächenflüssigkeit lösen [Chandrapala u. a., 2012]. Dieses Phänomen ist als Ultraschallkavitation bekannt. Lucas u. a. [2005] betont die Beziehung zwischen Ultraschallschneideparametern und der erzeugten Temperatur auf der geschnittenen Oberfläche. Es sollten die optimalen Schnittparameter gefunden werden, damit Schäden auf der organischen Probe vermieden werden können. Cardoni u. a. [2006] berichtet basierend auf den Ergebnissen von Lucas u. a., dass die Temperatur als Effekt der absorbierten Schwingungen des Werkzeugs in einem kontrollierten Bereich gehalten werden kann, wenn Schnittparameter wie Blechform, Schwingungsgeschwindigkeit, Kraft, eingestellte Frequenz und Kontakteigenschaften geregelt werden. In andere Richtungen forschen Zahn u. a. [2006], um die Schnittleistung in Bezug auf die vertikale Schnittgeschwindigkeit und die Schwingungsmagnitude zu untersuchen. Zahn u. a. berichten über eine korrelierte Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Schwingung, in der die Schnittleistung sinkt. Die Temperatur wurde in dem Versuch nicht beachtet.

Weitere Vorschläge zur Verwendung des Ultraschalls sind bei Chemat u. a. [2011] zu fin-

den. Besonders interessant ist die positive Nutzung des Ultraschallkavitationsphänomens. Unter Ultraschallkavitationsarten sind sowohl transiente als auch stabile zu unterscheiden. Die transiente Ultraschallkavitation kann zu enormen Schäden auf der Schnittoberfläche führen. Dagegen produziert die stabile Ultraschallkavitation positive Effekte, da durch den Ultraschall oszillierende Gasblasen Mikrostrom produzieren. Das direkte Ergebnis dieses Prozesses ist mikrobiologischer Stress, der wiederum die mikrobiologische Aktivität deaktiviert.

2.3 Untersuchungen von Produktqualität und deren Abhängigkeit vom Schneideprozess

Die Qualität geschnittener Produkte hängt von einer Vielzahl von Kriterien ab. Im Folgenden wird eine Übersicht über die wichtigsten Qualitätskriterien gegeben. In dieser Arbeit werden davon nur die Kriterien der Oberflächenrauigkeit und der Farbe weiter untersucht.

Die Qualität eines landwirtschaftlichen Produkts setzt sich generell aus Wahrnehmungsvariablen wie Aroma, Fruchtigkeit, Süßigkeitsherbheit, Härte und sensorische Eigenschaften wie die Farbe zusammen. In dem Bereich gibt Mizrach [2008] eine Übersicht über die in den letzten zwei Jahrzehnten erfolgten Studien und Geräten zur Bestimmung der Materialeigenschaften von frischem Obst und Gemüse.

Cliff u. a. [2010] haben z.B. die Qualität von Apfelscheiben analysiert, die in zwei kontrollierten Atmosphären gelagert wurden. Cliff u. a. haben vier Qualitätseigenschaften für ihre Beobachtung benutzt: Farbe (CIE-L), Menge an gepresstem Saft, auflösbarer Festkörper-Inhalt (Engl. SSC: soluble solids content) und pH-Wert. Auf gleiche Weise haben Saftner u. a. [2007] die Qualität von in kontrollierten Atmosphären gelagerten Melonen studiert. Sie ermittelten den Qualitätswert der geschnittenen Melone anhand der Textur, Farbe, dem pH-Wert der geschnittenen Oberfläche und dem auflösbaren Festkörper-Inhalt (Engl. SSC: soluble solids content).

Um die Qualität und die Haltbarkeit von frischen Früchten und Gemüse zu verbessern, ist es wichtig, die Prozesse, die zur Veränderung des Erscheinungsbildes und der Textur des Produktes führen, zu verstehen. Zwar existieren viele Untersuchungen über die biochemischen Eigenschaften und die Veränderung von Textur und Erscheinungsbild der unbeschädigten Agrarprodukte und deren Gewebesystemen, jedoch ist über die Auswirkung des Schneideprozesses auf das fertige Produkt bisher eher wenig bekannt. Toivonen u. Brummell [2008] geben daher einen Überblick über die bisher gewonnenen Erkenntnisse. Für die Veränderungen des Erscheinungsbildes gibt es mehrere, nicht unbedingt miteinander in Korrelation stehende Faktoren, wie Wundeffekte, mikrobieller Befall oder ein Austrocknen, die jedoch das Erscheinungsbild alle maßgeblich verschlechtern können. Ein vor allem für weißfleischige Früchte relevantes Problem, welches aber auch in anderen frisch geschnittenen Agrarprodukten vorkommt, ist die enzymatische Bräunung der Schnittfläche. Diese Bräunung entsteht durch eine Interaktion von Polyphenoloxidase (PPO), Polyphenolen und Sauerstoff; ihr Vorkommen innerhalb der Zelle ist in Abbildung 2.3 dargestellt

Die Reife zum Zeitpunkt der Weiterverarbeitung hat einen großen Einfluss auf die

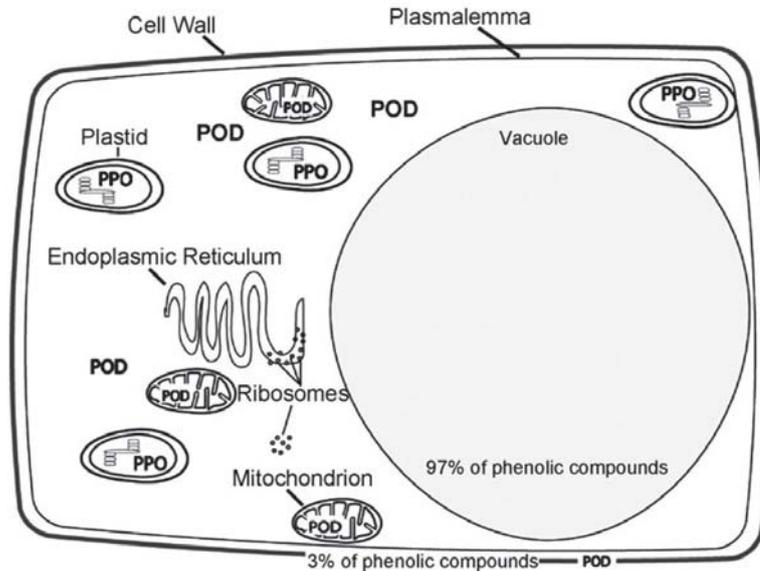


Abbildung 2.3: Verteilung der Phenolkomponenten und oxydierenden Enzyme (Polyphenoloxidase und Peroxidase) in einer typischen Pflanzenzelle. [Toivonen u. Brummell, 2008]

Haltbarkeit des geschnittenen Produkts [Lana u. a., 2005]. Da geschnittene Agrarprodukte verwundete Oberflächen mit zerstörten Zellen aufweisen, verderben sie generell schneller als unbeschädigte Agrarprodukte. Sowohl bei geschnittenen Früchten, als auch bei geschnittenem Gemüse, kommt es durch Verwundung und mechanischer Beschädigung zu einer erhöhten Atmung und Ethylenproduktion, die sich vor allem bei klimakterischen Früchten dadurch negativ auf die Haltbarkeit auswirken kann, dass sie die Reifung und das Weichwerden fördert. Beispielsweise beschleunigt eine Konzentration von $2 \frac{\mu\text{l}}{\text{l}}$ Ethylen das Weichwerden von Bananen- und Kiwischeiben bei 20°C [Abe u. Watada, 1991]. Der Effekt wurde bereits nach einem Tag sichtbar, was eine Kontrolle der Ethylenproduktion notwendig macht. Außerdem kann es zu einer Anreicherung des Gases in der Verpackung kommen.

Die bei der Verarbeitung frischer Früchte entstehende Beschädigung stellt einen der größten Stressfaktoren dar. Die bisher angewandten Schneideprozesse führen zu einem Auseinanderreißen des Zellgewebes, welches eine Vermischung von Enzymen und Substraten zur Folge hat. Eine der häufigsten Folgen der Beschädigung von Pflanzenzellgewebe ist die Steigerung der Atmung und der Ethylenproduktion.

Allong u. a. [2001] fanden heraus, dass das Schneiden von Mangos keinen messbaren Effekt auf deren Ethylenproduktion hatte. Bei unreif geschnittenen Mangos war die Atmungsrate direkt nach dem Schneiden stark erhöht, sank dann ab und lag schließlich während der gesamten Lagerzeit über der Atmungsrate der ganzen Früchte. Die beobachtete verstärkte Atmungsrate unreifer Mangos konnte jedoch bei halbreif oder reif geschnittenen Mangos nicht festgestellt werden. Zwar war die Atmungsrate direkt nach dem Schneiden etwas erhöht, sie normalisierte sich jedoch schnell wieder auf den Wert der ganzen Früchte.

Gil u. a. [2006] beschäftigten sich mit den Qualitätsveränderungen und der Nährstoffretention in frisch geschnittenen und ganzen Früchten während der Lagerung. Untersucht

wurden dazu Ananas, Mangos, Cantaloup-Melonen, Wassermelonen, Erdbeeren und Kiwis, die für bis zu 9 Tage jeweils geschnitten und ganz bei 5°C aufbewahrt wurden. Geschnittene Kiwis zeigten eine sehr geringe Haltbarkeit von unter 6 Tagen, bei Ananas, Cantaloup-Melonen und Erdbeeren betrug sie unter 9 Tage, wohingegen die geschnittene Wassermelone sowie die Mango auch nach 9 Tagen noch marktfähig waren. Sie stellten fest, dass frisch geschnittene Früchte im Allgemeinen sichtbare Anzeichen von Verderb aufweisen, bevor sich ihr Nährstoffgehalt signifikant verändert.

Rivera-López u. a. [2005] untersuchten den Einfluss der Schneideform (Würfel oder Scheiben) und der Aufbewahrungstemperatur (5°C , 10°C , 20°C) auf die Qualität von frisch geschnittener Papaya der Sorte „Maradol“. Hierzu wurden die CO_2 -Produktion, die Farbe, die Festigkeit, der Zuckergehalt, der Gewichtsverlust, der Vitamin C-Gehalt, der B-Carottingehalt sowie die antioxidativen Eigenschaften während einer 18-tägigen Lagerdauer untersucht. Sie stellten fest, dass die Form der geschnittenen Papaya kaum Auswirkungen auf die Haltbarkeit hatte, wobei die Scheiben mit einer maximal 2 Tagen längeren Haltbarkeit etwas besser abschnitten. Obwohl die Temperatur keinen Einfluss auf die Farbveränderung hatte, wirkte sich eine niedrige Temperatur positiv auf die Festigkeit des Fruchtfleisches aus. Die beste Aufbewahrungstemperatur betrug 5°C , bei 10°C betrug die Haltbarkeit nur 6 Tage. Temperaturen von über 10°C sind als nicht empfehlenswert einzustufen, da die Haltbarkeit dann weniger als 5 Tage betrug. Generell wurde die Haltbarkeit durch das äußere Erscheinungsbild begrenzt, während der Vitamin C und der B-Carottingehalt sowie die antioxidativen Eigenschaften bis zu diesem Zeitpunkt kaum abnahmen. Schon Bolin u. a. [1977] stellten fest, dass das Schneiden mit einer scharfen Klinge bezüglich der Qualität und Haltbarkeit von geschnittenem Salat sowohl besser als das Hacken mit einer scharfen Klinge, als auch das Schneiden oder Hacken mit einer stumpfen Klinge ist.

Barry-Ryan u. O’Beirne [1998] untersuchten den Einfluss der eingesetzten Schneidemethode auf die Qualität und die Haltbarkeit von frisch geschnittenen Karottenscheiben. Es kamen makellose Karotten mit einem Durchmesser von 3 – 4cm zum Einsatz, die mit einer Rasierklinge, sowie einem scharfen und einem stumpfen Maschinenmesser in 6mm dicke Scheiben geschnitten und anschließend verpackt und bei 8°C aufbewahrt wurden. Sie stellten fest, dass die Schneidemethode einen starken Effekt auf die Qualität und die Haltbarkeit der Karottenscheiben hat und kamen zu dem Schluss, dass die Haltbarkeit durch die Anwendung einer möglichst scharfen Klinge und der daraus resultierenden geringeren Beschädigung des Pflanzengewebes verlängert werden kann. Die besten Ergebnisse lieferte die Rasierklinge, gefolgt vom scharfen Maschinenmesser. Die schonenderen Schneidemethoden verursachten weniger physiologischen Stress und Beschädigung und zeigten einen geringeren mikrobiellen Befall auf, was wiederum zu weniger starker Geruchsbildung führte. Außerdem war das allgemeine Erscheinungsbild sowie die Aromaretention besser. Auch Watada u. Qi [1999] stellten fest, dass die weiße Verfärbung und die Dehydrierung von geschnittenen Karotten bei Einsatz einer sehr scharfen Klinge durch eine Reduktion der dabei beschädigten Zellen maßgeblich verringert werden konnte.

Portela u. Cantwell [2001] untersuchten den Einfluss der Schärfe der eingesetzten Klinge und den Grad der Zerstörung des Gewebes auf die Qualität von zylindrisch geschnittenen Cantaloup-Melonen. Die Melonenstücke wurden dafür am Tag des Schneidens, nach 6, 9 und 12 Tagen auf subjektive (allgemeine optische Qualität, Fäule, Transluzenz, unangenehmer Geruch und Aroma) und objektive (Farbe, Festigkeit, Feststoffgehalt,

Zuckergehalt sowie fermentative flüchtige Bestandteile) Qualitätsmerkmale untersucht. Außerdem wurde die Atmungs- und Ethylenproduktionsrate bestimmt. Es wurden verschiedene Melonensorten jeweils mit einer scharfen und einer stumpfen Edelstahlschneide geschnitten. Obwohl die optischen Eigenschaften aller Proben zu Beginn exzellent waren, hatten die mit scharfer Klinge geschnittenen Melonenstücke ihr äußeres Erscheinungsbild nach 6 Tagen praktisch nicht verändert, während sich die mit stumpfer Klinge geschnittenen Proben erheblich verfärbt hatten und eine glasige Oberfläche aufwiesen. Zwar hatte die Schärfe der Schneide keinen Einfluss auf das Aroma, jedoch wiesen die mit stumpfer Schneide geschnittenen Melonenstücke einen unangenehmen Geruch auf. Die Festigkeit und der Zuckergehalt wurden durch das Schneidverfahren nicht beeinflusst, die mit stumpfer Schneide geschnittenen Stücke produzierten aber etwas mehr Ethylen. Insgesamt führte das Schneiden mit der scharfen Schneide bei einer Lagerung von 5°C zu einer längeren Haltbarkeit gegenüber dem Schneiden mit stumpfer Schneide.

Toivonen u. a. [2006] untersuchten die Eignung von Süßkirschen für den Fresh-cut Sektor. Hierzu entfernten sie die Kerne mit zwei verschiedenen Schneidrohren, einmal mit scharfer gerader Schneidkante und einmal mit einer wellenförmigen Schneidkante, und untersuchten die Qualität der Süßkirschen nach 21 Tagen Lagerdauer. Sie stellten fest, dass das wellenförmige Schneidrohr weniger mechanische Belastung auf die Kirschen ausübte, sie daher weniger beschädigte und die Qualität in Form einer besseren Festigkeit und einem geringeren Wasserverlust signifikant besser war. Sie kamen zu dem Schluss, dass die Art des Schneidwerkzeugs einen großen Einfluss auf die Qualität hat.

In der vorliegenden Arbeit werden die Farbveränderungen nach dem Schnitt sowie die Rauigkeit der Schnittfläche als Qualitätskriterien herangezogen, da diese Größen gute Qualitätsindikatoren sind und zudem messtechnisch leicht erfassbar sind.

2.4 Wasserstrahlschneiden in der Lebensmitteltechnik

Schon seit langem ist der Gebrauch des Wasserstrahlschneidens in der Lebensmittelverarbeitung bekannt. Valco u. a. [1979] untersuchten beispielsweise den Nutzen eines mobilen Wasserstrahlschneideequipments zum Ernten von Zuckerrohr, kamen jedoch zu dem Schluss, dass der Einsatz nicht praktikabel ist. Henning [1998] berichtet über den erfolgreichen Einsatz des Wasserstrahlschneidens für eine Vielzahl von Lebensmitteln, wie z.B. Fleisch, Pasta, Backwaren, Süßwaren und Gemüse.

Orr u. Spingler [1985] ließen eine „Methode zum Schneiden von Obst und Gemüse“ patentieren, die sich die Wasserstrahlschneidetechnik zu Nutzen macht. Rudy u. Tomlin [1988] ersannen eine „Methode und Apparat zum automatischen Schneiden von Nahrungsmitteln in ein festgelegtes Gewicht oder eine festgelegte Form“ und Lobash u. a. [1990] meldeten einen „Apparat und Methode, die das Wasserstrahlschneiden nutzt, um gefrorene Fischblöcke in eine Vielzahl individueller Formen zu schneiden“ zum Patent an. In ihrer Patentschrift geben Orr u. Spingler an, dass es sich bei Ihrer Erfindung zum Schneiden von Obst und Gemüse um eine Methode handelt, die einen Hochdruckflüssigkeitsstrahl nutzt, um Obst und Gemüse zu schneiden, und dabei ein Quetschen sowie die Beschädigung des Zellgewebes an der Schnittkante vermindert. Sie geben an, dass die ursprünglichen Eigenschaften des Produkts auch nach dem Schneiden erhalten bleiben und die Haltbarkeit gegenüber den bis dato angewandten Schneidmethoden signifikant

verbessert wird. Als Obst und Gemüse, das für das Wasserstrahlschneiden in Frage kommt, nennen sie Wurzelgemüse und Blattgemüse, Zitrusfrüchte und Melonen, sowie generell alle Obst- und Gemüsesorten mit fester Textur. Die längere Haltbarkeit führen sie darauf zurück, dass dem Gewebe bei korrekter Lagerung die Möglichkeit dazu gegeben wird, eine sehr dünne trockene Schicht zu bilden, die mikrobielles Wachstum und Enzymreaktionen verlangsamt. Zur Evaluierung ihrer neuen Methode führten Orr u. Spingler Versuche mit Sellerie und Karotten durch. Sie schnitten das Gemüse dazu mit dem Wasserstrahl sowie mit mehreren anderen konventionellen Methoden. Nach dem Schneiden behandelten sie alle Proben mit gechlortem Wasser und bewahrten sie bei 10° bzw. 3°C auf. In beiden Versuchsreihen ergaben sich deutliche Vorteile für die mit Wasserstrahl geschnittenen Proben.

Rudy u. Tomlin schlagen zur Verwendung ihrer Methode und ihres Apparats zum Schneiden von Nahrungsmitteln einen Laser- oder Hochdruckwasserstrahl vor. Sie geben dabei dem Wasserstrahl den Vorzug, weil sie ihm eine hohe Schneidegenauigkeit zusprechen und er ihrer Meinung nach außerdem den Materialverlust beim Schneiden minimiert, sowie den Verderb des Produkts verzögert, da die Methode sauberer ist als herkömmliche Schneidemethoden.

Becker u. Gray [1992] setzten einen Wasserstrahl zum Schneiden von Kartoffeln in Scheiben und in die typische Pommes Frites Form ein. Zum Einsatz kam mit UV-Licht desinfiziertes Leitungswasser, Düsendurchmesser zwischen $76\mu\text{m}$ bis $584\mu\text{m}$, ein Wasserdruck von 69MPa bis 380MPa und – abhängig vom Düsendurchmesser – ein Wasserverbrauch zwischen $0.098\frac{\text{l}}{\text{min}}$ für die kleinste und $8.37\frac{\text{l}}{\text{min}}$ für die größte Düse. Zur Durchführung der Versuche verwendeten Becker u. Gray eine Wasserstrahlschneideanlage der Firma Flow Systems International, Modell G-411a. Der Abstand der Düse zum zu schneidenden Produkt betrug bei fast allen Versuchen 3.5cm . Sie verwendeten keine spezielle Halterung für die Kartoffeln, sondern fixierten diese am Tisch oder hielten sie während des Schneidens in der Hand. Um eine größtmögliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Kartoffeln vor den Versuchen in $2 \times 2\text{ cm}$ große Würfel geschnitten. Die Vergleichsproben wurden mit einem neuen, scharfen Edelmessers geschnitten. Für die zweite Versuchsreihe, den Kochtest, wurden jeweils von Hand und per Wasserstrahl Pommes geschnitten, die 1cm^2 breit waren und deren Länge je nach Kartoffel variierte. Diese Proben wurden mit Leitungswasser abgewaschen, blanchiert und frittiert. Die Proben wurden sofort nach dem Frittieren sowie nach Abkühlen auf Raumtemperatur untersucht. Für die wasserstrahlgeschnittenen Proben wurden leichte Unregelmäßigkeiten der Farbe festgestellt, sie unterschieden sich jedoch weder geschmacklich noch bezogen auf die Textur von den Vergleichsproben. Becker u. Gray stellten fest, dass der Wasserstrahl mit kleinerer Düse und geringerem Abstand zum zu schneidenden Objekt besser geformt war und nicht zur Tropfenbildung neigte. Sie schlagen vor, den Abstand zwischen Düse und Produkt zu verringern, um die Schnittbreite zu verkleinern und Spritzeffekte zu vermeiden.

In Vorversuchen mit relativ dichten Materialien wie Holz und Plastik hatten die Autoren eine Temperaturerhöhung festgestellt, die für die Kartoffel ein beschleunigtes Verderben bedeuten könnte. Daher platzierten sie ein Thermoelement so nah wie möglich an der Schnittkante auf der Oberfläche der zu schneidenden Probe. Sie konnten allerdings keinen Temperaturanstieg feststellen, was sie auf den Wasserkontakt und den damit verbundenen Abtrag von geschnittenem Zellmaterial zurückführten. Generell wiesen die mit Wasserstrahl geschnittenen Proben Furchen auf, die am Eintritt des Strahls am kleinsten

waren und mit steigendem Abstand zur Düse größer wurden, die Schnittoberfläche war sehr uneben. Auch die Kartoffeln, die mit den vermeintlich besten Einstellungen geschnitten wurden, wiesen diese Furchen auf, wohingegen die Oberflächen der messergeschnittenen Kontrollproben ein ebenmäßiges, weiches Erscheinungsbild hatten. Eine mikroskopische Untersuchung ergab, dass die Oberflächenzellen der mit Wasserstrahl geschnittenen Proben zwar noch erkennbar, aber leer waren, was bedeutet, dass der Wasserstrahl den Großteil des Zellinhalts abgespült hatte. Die Vergleichsproben hingegen hatten weniger zerstörte Oberflächen und die Zellen schienen mit Zellmaterial gefüllt zu sein (siehe Abbildung 2.4). Bei optimalen Einstellungen des Wasserstrahls wurden die Proben gleich schnell braun wie die messergeschnittenen Proben, bei schlechten Einstellungen wurden die Kartoffeln jedoch noch brauner. Die besten Schnitte wurden mit dem kleinsten Düsendurchmesser erreicht, unabhängig vom Wasserdruck und der Wassergeschwindigkeit. Der Abstand sollte auf maximal 0.5cm zwischen Düse und zu schneidendem Produkt verringert werden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass es viele mögliche Einstellungen für das Wasserstrahlschneiden von Kartoffeln gibt und dass diese von den jeweiligen Erfordernissen des Produzenten, dem Ausgangsmaterial, dem Verwendungszweck und dem gewünschten Erscheinungsbild abhängen. Sie geben jedoch zu bedenken, dass das Wasserstrahlschneiden im industriellen Einsatz nicht so schnell ist wie das kommerzielle Schneiden.

Tatsumi u. a. [1993] untersuchten (basierend auf dem Patent von Orr u. Spingler [1985])

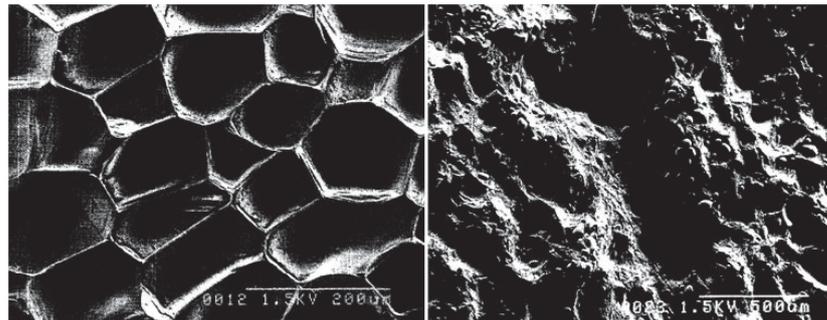


Abbildung 2.4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von geschnittenen Kartoffeln: links Messerschnitt, rechts Wasserstrahlschneidetechnik [Becker u. Gray, 1992]

den Einfluss von Natriumchloridbehandlung und Wasserstrahlschneiden auf die Entwicklung weißer Verfärbungen von Karottenstiften. Sie beobachteten, dass die Verfärbungen bei Behandlung mit Natriumchloridlösungen mit steigender Konzentration abnahmen. Die Autoren führten dies darauf zurück, dass die erhöhte Salzkonzentration eine osmotische Bewegung des Wassers aus der Zelle heraus verursachte und deren innerzellulärer Druck dadurch abnahm. Auf Grund des niedrigeren Druckes reagierten die Zellen weniger intensiv auf den Schnitt als unbehandelte Zellen. Außerdem gehen die Autoren davon aus, dass die Salzlösung als Inhibitor für Enzyme agiert, die an der Verfärbungsreaktion beteiligt sind. Jedoch führte die Behandlung zu einem signifikanten Gewichtsverlust, der für den Verkauf nicht tolerierbar gewesen wäre. Die wasserstrahlgeschnittenen Proben hatten eine unebene Oberfläche und wiesen Furchen auf. (Siehe Abbildung 2.5).

Die weiße Verfärbung nach einem Tag war vergleichbar mit der Verfärbung der messergeschnittenen Probe, jedoch schnitten die mit der Rasierklinge geschnittenen Proben

wesentlich besser ab und wiesen kaum weiße Verfärbungen auf. Zusätzlich wurden, nach der CIE-Lab-Farbraum-Darstellung, die L^* , a^* und b^* -Werte aller Proben bestimmt. Auch hier war die Rasierklinge deutlich überlegen, die größte Farbveränderung ließ sich bei den wasserstrahlgeschnittenen Proben beobachten. Aus den Ergebnissen von Becker u. Gray [1992] schlussfolgerten Tatsumi u. a., dass die weiße Verfärbung von Karotten durch das Wasserstrahlschneiden reduziert werden könnte. Wie bereits erwähnt, bemerkten Becker u. Gray, dass beim Wasserstrahlschneiden von Kartoffeln der Zellinhalt von der Oberfläche entfernt wurde. Tatsumi u. a. vermuteten daher, dass auch lose Zellreste entfernt werden würden, die für die weiße Verfärbung von Karotten verantwortlich sind. Diese Theorie wurde jedoch nicht bestätigt. Allerdings kommen Tatsumi u. a. zu dem Schluss, dass durch den Einsatz einer kleineren Düse und durch Optimierung der Einstellungen, wie von Becker u. Gray [1992] vorgeschlagen, möglicherweise wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden könnten.

Bansal u. Walker [1999] untersuchten das Wasserstrahlschneiden von Hähnchenbrust. Die

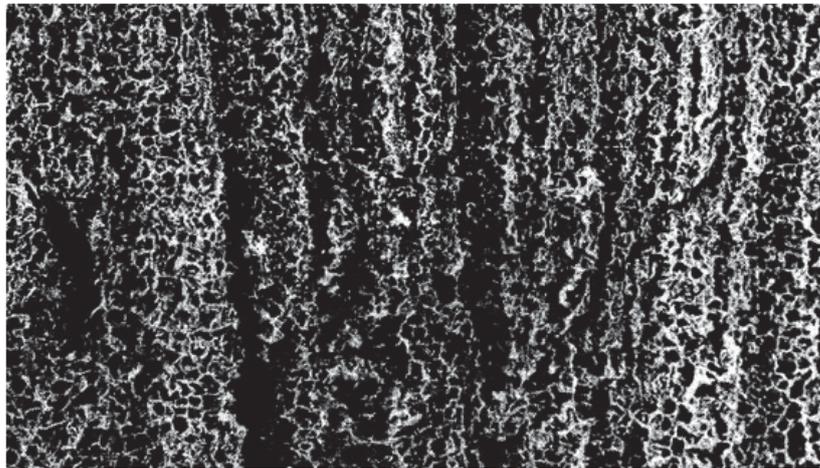


Abbildung 2.5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von wasserstrahlgeschnittenen Karotten [Tatsumi u. a., 1993]

größten Vorteile gegenüber konventionellem Schneiden sahen sie in der präzisen Kontrolle von Form und Größe der geschnittenen Portion, deutlich geringerer Kreuzkontamination und den relativ sauberen Schnitten des schnellen und reibungslosen Schneidens. Das Hauptproblem sahen sie in Fleischverlusten durch nicht kohärenten Wasserstrahl. Ziel der Untersuchung war, die aufgeführten Parameter so aufeinander abzustimmen, dass eine möglichst gute Schnittqualität erreicht werden kann. Die besten Ergebnisse wurden bei mittlerem Düsendurchmesser, hohen Drücken und kleinen Düsenausgangsgeschwindigkeiten erreicht.

McGlynn u. a. [2003] untersuchten den Effekt eines Desinfektionsdips und des Wasserstrahlschneidens auf die Qualität und die Haltbarkeit von frisch geschnittener Wassermelone. Sie tauchten dazu ganze Wassermelonen in eine Hypochloritlösung, schnitten sie mit einem Messer oder dem Wasserstrahl und lagerten sie für 14 Tage bei $4^{\circ}C$. Die Desinfektion hatte weder auf den pH-Wert, noch auf den Zuckergehalt einen Einfluss, wirkte sich jedoch positiv auf die mikrobielle Qualität aus. Die mit Wasserstrahl geschnittenen Melonenstücke waren dunkler und wiesen einen geringeren Gewichtsverlust

auf, als die mit dem Messer geschnittene Vergleichsprobe. Die möglichen Vorteile des Wasserstrahlschneidens für Melonen sehen McGlynn u. a. [2003] in dessen Automatisierung, der Flexibilität, der Minimierung von Kreuzkontamination und einem immer scharfen Schneideinstrument. Für das Wasserstrahlschneiden kam das Modell PMH von Ingersoll Rand zum Einsatz, geschnitten wurde mit einer Düse von 0.018mm und bei einem Druck von 344.7MPa . Die Vergleichsproben wurden mit einem desinfizierten Messer geschnitten. Die mit Wasserstrahl geschnittenen Stücke waren fester, was auch mit dem geringeren Gewichtsverlust dieser Proben zusammenhängen könnte. Die mikrobiellen Eigenschaften waren bei beiden Proben vergleichbar. Jedoch vermuten die Autoren, dass der Einsatz des Wasserstrahlschneidens einen Einfluss auf die Kaufentscheidung des Kunden haben könnte, da die Melonen durch die bessere Festigkeit einen frischeren Eindruck machen als die mit Messer Geschnittenen. Sie empfehlen weitere Versuche unter Zugabe von Desinfektionsmitteln in das Schneidewasser.

Allende u. a. [2006] führen den Einsatz des Wasserstrahlschneidens als kontaktloses Schneideverfahren an, mit dessen Hilfe sich die Produktqualität vieler geschnittener Nahrungsmittel verbessern lässt.

Nicola u. a. [2009] geben an, dass das Wasserstrahlschneiden im Fresh-Cut eine gute Alternative zu kommerziellem Schneiden darstellt. Dies begründen sie mit einer geringeren Beschädigung des Zellgewebes, was zur besseren Erhaltung der ursprünglichen sensorischen Eigenschaften der Früchte wie Geruch, Textur und Geschmack beiträgt. Außerdem stellten sie fest, dass das Wasserstrahlschneiden zusammen mit den adäquaten Lagerbedingungen zu einer Verlängerung der Haltbarkeit frisch geschnittener Produkte im Vergleich zu den bisher eingesetzten Schneidemethoden führt. Die Effizienz des Verfahrens ist dabei vom Düsendurchmesser, dem Wasserdruck und der Entfernung zwischen Düse und zu schneidendem Objekt abhängig, die je nach Produkt variieren. Vor allem für Obst und Gemüse mit fester Textur erachten die Autoren den Einsatz des Wasserstrahlschneidens für sinnvoll.

Die Auswahl eines geeigneten Schneideverfahrens für Lebensmittel und landwirtschaftliche Produkte erfolgt unter Berücksichtigung der Kosten und der erzielbaren Schnittqualität. Häufig werden Nahrungsmittel mit Ultraschall-basierten Verfahren geschnitten. Bei diesem Verfahren ist jedoch die wiederholte Nutzung des gleichen Schnittwerkzeuges hygienisch nachteilig, wie bei traditionellen Schnittverfahren. Außerdem ergeben sich bei Ultraschall-Schneideverfahren Wärmeeffekte im Schnittgut. Dies ist auch ein großer Nachteil der Laser-basierten Schneideverfahren. Diese bewirken aufgrund der thermischen Belastung des Produktes Nekrosen an den Schnittflächen. Nachteilig bei Laser-basierten Verfahren sind auch die Kosten, die bei leistungsfähigen Verfahren und Apparaten sehr hoch sind.

Hingegen ist die Wasserstrahl-basierte Schneidetechnologie den anderen Schneideverfahren in diesen Punkten überlegen. Hygienische Probleme können im Gegensatz zu Ultraschall-systemen nicht auftreten, da kein Schneidewerkzeug im eigentlichen Sinne verwendet wird. Thermische Effekte treten nicht auf oder sind vernachlässigbar gering. Die Kosten des Verfahrens sind niedrig, weil Geräte zur Erzeugung des Wasserstrahls aus anderen Technikbereichen, z. B. der Reinigungs- und Oberflächentechnik benutzt werden können.

Die Wasserstrahltechnik wurde insbesondere im Bereich der Lebensmitteltechnik und Agrarwissenschaft angewendet, um sowohl bestimmten Analysen wie zum Beispiel Verbräunung, Gewichtsverlust von bereits geschnittenen Agrarprodukten (Früchte, etc.)

durchzuführen, als auch die Qualität des Produktes innerhalb eines Schneideprozesses zu bestimmen. Die vorliegende Arbeit stellt die Entwicklung eines Schälverfahrens dar, bei welchem ein Hochdruckwasserstrahl als Schneidemethode Anwendung finden soll. Der Schnittprozess wurde durch Bildverarbeitungs- und Robotertechniken unterstützt. Hierbei handelt es sich um eine Kombination verschiedener (o.g.) Techniken, die die Entwicklung eines modernen und hochautomatisierten Schälverfahrens darstellt.

Im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche stellte sich heraus, dass bis zum heutigen Zeitpunkt keine Beiträge zum Thema „Schälen von Agrarprodukten mittels Hochdruckwasserstrahltechnik“ zu finden sind. Zum Thema „Wasserstrahlschneiden“ konnte nur eine geringe Anzahl an Literatur aufgefunden werden. Ungeachtet dessen stellt dies die Basis dieser Arbeit dar, um Unterschiede darstellen zu können.

Eine wichtige Rolle bezüglich der Wasserstrahlschneidetechnik, spielen die Untersuchungsergebnisse von McGlynn u. a. [2003] und Brüser [2008]. Sie haben in ihren Studien physikalische Eigenschaften wie Farbe, Texture, pH-Wert, Gewichtsverlust, etc. von geschnittenen Melonen [McGlynn u. a., 2003] bzw. Wasserstrahlschnittparameter für Zuckerrüben [Brüser, 2008] untersucht. Dabei wurden die Melonen in zwei unterschiedlichen Weisen vorbereitet. Die Vorbereitung wurde entweder mit Wasserstrahl oder mit einem desinfizierten Messer durchgeführt. Hierbei wurde von McGlynn u. a. festgestellt dass, die Produktqualität stark von dem Schneideparameter abhängig ist. Die vorliegende Arbeit stellt eine Weiterentwicklung des Konzeptes von McGlynn u. a. und Brüser dar, indem hier die Schneideparameter anhand der Oberflächerauheit und Farbe untersucht werden. Basierend auf Untersuchungsergebnissen von Ligocki [2005], bezüglich des Einsatzes von Wasserstrahlschneiden von Zuckerrüben, entwickelte Brüser u. Harms [2005], ein Gerät, um die Schneideparameter zu optimieren. Dies gilt bis heute als Referenzpunkt beim Einsatz der Wasserstrahltechnik in der Agrarwissenschaft.

Frühere Untersuchungen zum Hochdruckwasserstrahlschneiden, die beispielsweise von Alitavoli u. McGeough [1998], an Fleisch, Becker u. Gray [1992] an Kartoffeln und Ligocki [2005] an Zuckerrüben durchgeführt wurden, haben die prinzipielle Eignung dieser Technologie gezeigt. Allerdings wurde in keiner der Untersuchungen die Möglichkeiten zur Automatisierung des Prozesses und die Qualität der Schnitte berücksichtigt. Wenn es gelingt, ein Verfahren zu entwickeln, welches Bildaufnahme und Bildauswertung mit der Erzeugung und Steuerung des Hochdruckwasserstrahls verbindet, steht ein modernes, effektives Schäl- und Schneideverfahren zur Verfügung. Dieses Verfahren erfüllt die oben genannten Forderungen und hat zudem ein hohes Automatisierungspotential. Es kann daher einfach und sinnvoll in vorhandene Prozessketten zur Nahrungsmittelproduktion integriert werden.

Die vorliegende Arbeit bietet einen Einblick über ein neu entwickeltes Verfahren zum Schälen von Agrarprodukten, die aus einer Kombination von Bildverarbeitungs-, Roboter- und Wasserstrahltechnik besteht. Das Thema könnte als innovativer Beitrag in der Agrarwissenschaft gelten.

Tabelle 2.1: Einsatz des Wasserstrahlschneidens in der Lebensmitteltechnik und den Agrarwissenschaften. Zusammenfassung

| Autor | Produkt | Ergebnisse |
|----------------------------------|--|---|
| Valco u. a. [1979] | Mobile Wasserstrahlschneide-Aparatur zum Ernten von Zuckerrohr | nicht praktikabel |
| Henning [1998] | Einsatz von Wasserstrahlschneiden in Lebensmitteln. (Fleisch, Pasta, Süßwaren und Gemüse) | Einsatz erfolgreich |
| Orr u. Spingler [1985] | Methoden zum Schneiden von Obst und Gemüse | Patent |
| Rudy u. Tomlin [1988] | Methode und Apparat zum automatischen Schneiden von Nahrungsmitteln in ein festgelegtes Gewicht oder eine festgelegte Form | Patent |
| Lobash u. a. [1990] | Apparat und Methode für die Nutzung von Wasserstrahlschneiden, um gefrorene Fischblöcke in eine Vielzahl individueller Formen zu schneiden | Patent |
| Becker u. Gray [1992] | Einsatz von Wasserstrahltechnik zum Schneiden von Scheiben und der typischen Pommes Frites Form | nicht praktikabel. Niedrige Schnittqualität |
| Bansal u. Walker [1999] | Einsatz des Wasserstrahlschneidens von Hähnchenbrust | Präzise Kontrolle von Form und Größe geringer Kontamination |
| McGlynn u. a. [2003] | Untersuchung der Effekte eines Desinfektionsverfahrens und des Wasserstrahlschneidens auf die Qualität und die Haltbarkeit von frisch geschnittener Wassermelone | |
| Ligoeki und Brüser [2005] [2008] | Untersuchung von Schneideparametern beim Schneiden von Zuckerrübern | Einsatz erfolgreich |

3 Technologische Grundlagen

3.1 Stand der Technik des Wasserstrahlschneidens

Fertigungsverfahren sind gemäß der Norm DIN [2003a] definiert als „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern; sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein“.

Der Vorgang des Trennens wird in der Norm DIN [2003a] in der 3. Hauptgruppe eingeordnet, wie in Tabelle 3.1 ersichtlich. Die Hauptgruppe 3 „Trennen“ ist wiederum in Sechs Gruppen gegliedert (siehe Tabelle 3.2) in denen gemäß der Norm DIN [2003c], der Gebrauch von Wasser als Strahlmittel speziell für die Fertigungstechnik als „Strahlspanen“ in Untergruppe 3.3.6 definiert ist und damit zur Gruppe 3.3 „Spanen mit geometrisch unbestimmtem Schneiden“ gehört, die ihrerseits in der Norm DIN [2003b] beschrieben wird.

Tabelle 3.1: Hauptgruppen des Fertigungsverfahrens nach DIN [2003a]

| Fertigungsverfahren | | | | | |
|---------------------|----------|----------------|-------|-------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Urformen | Umformen | Trennen | Fügen | Beschichten | Stoffeigenschaft ändern |

3.1.1 Schneidetechnologie

„Strahlen ist ein Fertigungsverfahren, bei dem Strahlmittel (als Werkzeuge) in Strahlgeräten unterschiedlicher Strahlensysteme beschleunigt und zum Aufprall auf die zu bearbeitende Oberfläche eines Werkstücks (Strahlgut) gebracht werden“ lautet nach DIN [2003c] die Definition des Verfahrens „Strahlen“. In ihrer allgemeinen Form werden die Strahlverfahren gemäß DIN [2003c] in verschiedene Bereiche je nach Strahlensystem, Strahlenanwendung und Strahlmittelart eingeteilt.

Beim Strahlensystem geht es um die physikalische Methode der Energiebereitstellung zur Beschleunigung des Strahlmittels. Wenn zum Beispiel Fluide oder Gase durch eine Düse strömen, wird die pneumatische oder hydraulische Druckenergie in kinetische Energie umgewandelt. Hierbei sind Strahlmedium bzw. Strahlmittel und Trägermedium zum Transport des Strahlmittels Bestandteile des Strahls. In dieser Hinsicht werden die Strahlverfahren je nach Trägermedium unterteilt in:

- Druckluftstrahlen
 - Nassdruckluftstrahlen

- Trockendruckluftstrahlen
- Druckflüssigkeitsstrahlen
- Dampfstrahlen

Die relevanten Anwendungen der Technologie des Strahlens gemäß DIN [2003c] werden je nach primärem Ziel oder Strahlzweck unterteilt (siehe Tabelle 3.3). Mehrere Strahlsys-

Tabelle 3.2: Unterteilung der Hauptgruppe 3 „Trennen“ des Fertigungsverfahrens nach DIN [2003a]

| 3. Trennen | | |
|-------------------|--|-------------------|
| 3.1 | Zerteilen | DIN 8588 |
| 3.2 | Spanen mit geometrisch bestimmtem Schneiden | DIN 8589-0 |
| 3.3 | Spanen mit geometrisch unbestimmtem Schneiden | DIN 8589-0 |
| 3.4 | Abtragen | DIN 8590 |
| 3.5 | Zerlegen | DIN 8591 |
| 3.6 | Reinigen | DIN 8592 |

teme wie z.B. Ultraschallstrahlen, Schleuderradstrahlen, Flammstrahlen, Kaltgasstrahlen usw., die in der Norm DIN [2003c] standardisiert sind, werden in Tabelle 3.4 der jeweiligen Hauptgruppe nach DIN [2003a] zugeteilt (siehe auch Tabelle 3.1).

Generell ist das „Trennen“, wie es in Schneide- und Schälprozessen für Agrarprodukte verwendet wird, in der Untergruppe 3.1 „Zerteilen“ und für sehr spezifische Applikationen auch in der Untergruppe 3.2 „Spanen mit geometrisch bestimmtem Schneiden“ anzusiedeln, wie in Kapitel 2 noch gezeigt werden wird.

Die gegenwärtige Arbeit zielt darauf ab, die Wasserstrahlschneidetechnologie speziell für das Schälen von Früchten einzusetzen, was ebenso zur Hauptgruppe 3 „Trennen“ gehört und sich dort als Untergruppe 3.3.6 „Strahlspanen“ und 3.6.1 „Reinigungsstrahlen“ eingliedert (siehe Tabelle 3.2 und 3.4).

In der vorliegenden Analyse wird das Schälen von Früchten mit dem in Untergruppe 3.3.6, nach DIN [2003a], zugeordneten Trennverfahren betrachtet. Diese Untergruppe 3.3.6 „Strahlspanen“ wird nach DIN [2003c] definiert bzw. normiert.

Im Allgemeinen lassen sich Fertigungsverfahren in manuell und maschinell einteilen. Das Verfahren wird in der vorliegenden Arbeit als maschineller und industrieller Prozess behandelt. Kulturelle Aspekte wie verschiedene Essgewohnheiten von Menschen an verschiedenen Orten und die Art, Früchte zu essen, werden hier nicht berücksichtigt.

3.1.2 Hochdruckwasserstrahlschneiden

In der Norm DIN [2003c] werden die Druckflüssigkeitsstrahlen bzw. Druckwasserstrahlen behandelt. Wasser ist in diesem Fall das Strahl- und Trägermedium. Wenn die Druckwasserstrahlen zum Trennen eingesetzt werden, sind zwei Arten von Strahlen nach der Strahlmittelart zu unterscheiden.

Der „Druckwasserstrahl“ nutzt zum Schneiden nur den an der Düse beschleunigten Wasserstrahl als Energieträger, während beim „Druckwasserabpressivstrahl“ die in einer

Tabelle 3.3: Klassifizierung der Strahlen nach Anwendung und Zweck

| Strahlanwendung | Strahlzweck | Haupteinsatzgebiet |
|--|--------------------------------|--|
| REINIGUNGSSTRAHLEN | | |
| | Putzen | Entfernen von Gießsand und Gießrückständen |
| | Entzundern | Entfernen von Walz und Schmiedezundern |
| | Entrosten | Entfernen von Rost |
| | Entschichten | Entfernen von Beschichtungen aller Art und Anhaftungen wie Schmutz oder Staub |
| Strahlspanen | | |
| | Abtragen | Entfernen von oberflächennahen Partikeln oder Schichten des Grundwerkstoffes |
| | Trennen | Zerteilen von Werkstücken |
| | Entgraten | Entfernen von Schnitt- und Gussgraten |
| OBERFLÄCHENVEREDELUNGSSTRAHLEN | | |
| | Aufrauen | Erhöhung der Oberflächenrauheit |
| | Mattieren | Aufrauen mit Strahlmitteln feiner Körnung |
| | Glätten | Verringerung der Oberflächenrauheit |
| | Polieren | Glätten mit Strahlmitteln feiner Körnung |
| KUGELSTRAHLEN (engl.: shot peening) | | |
| | Verfestigen (engl.: Peening) | Einbringung von Druckeigenstress an der Oberfläche dynamisch beanspruchter Bauteile zur Erhöhung der Wechselfestigkeit |
| | Umformen (engl.: peen forming) | Einbringung von Druckeigenstress zur Formgebung oder zum Richten von Bauteilen |

Tabelle 3.4: Einsatz von Strahlen innerhalb der Hauptgruppen der Norm DIN [2003a]

| Hauptgruppe | Gruppe | Untergruppe |
|----------------------------|--|--|
| 1. Urformen | | |
| 2. Umformen | 2.1 Druckumformen | 2.1.6 Umformstrahlen 2.1.7 Oberflächenveredelungsstrahlen |
| 3. Trennen | 3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmtem Schneiden 3.6 Reinigen | 3.3.6 Strahlspanen 3.6.1 Reinigungsstrahlen |
| 4. Fügen | | |
| 5. Beschichten | | |
| 6. Stoffeigenschaft ändern | 6.1 Verfestigen durch Umformen | 6.1.1 Verfestigungsstrahlen |

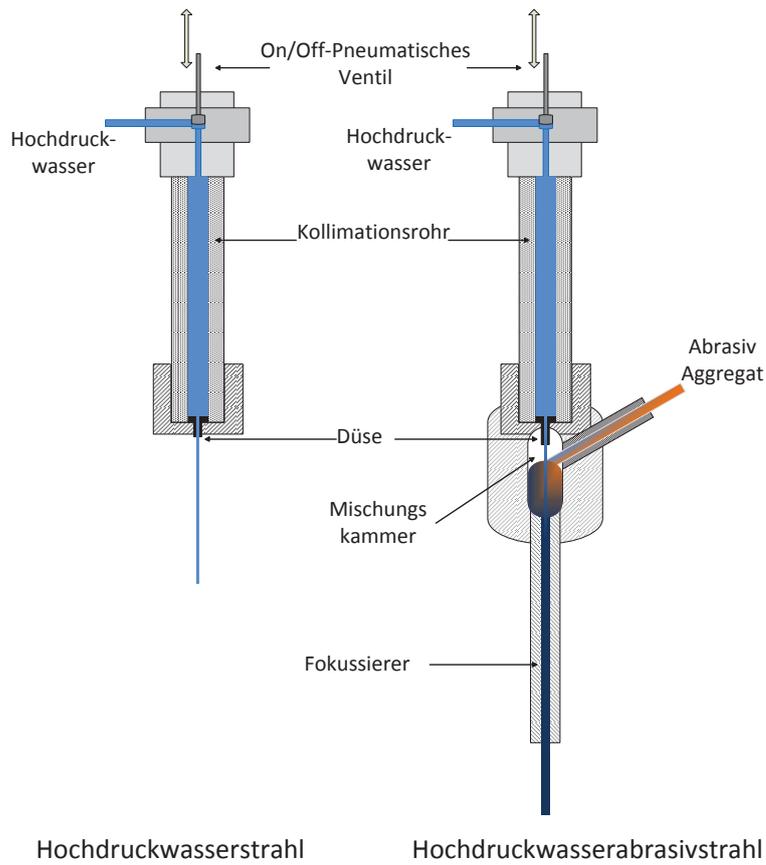


Abbildung 3.1: Unterschiedliche Arbeitsweisen des Hochdruckwasserstrahlens

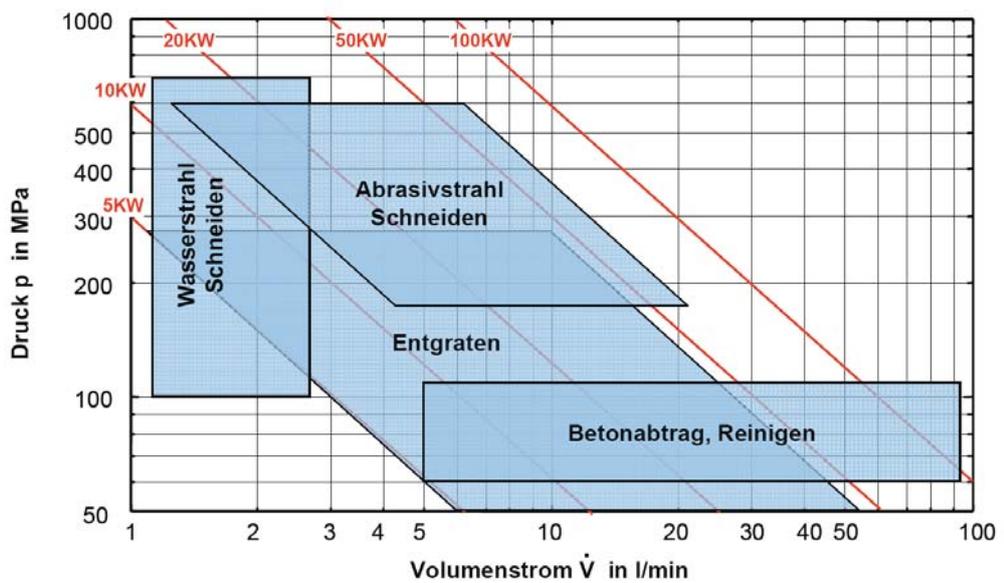


Abbildung 3.2: Anwendung der Wasserstrahltechnik mit ihrer typischen hydraulischen Leistung [Henning, 2008]

Mischungskammer durch den „Druckwasserstrahl“ beschleunigten Partikel als Energieträger genutzt werden. In der Regel handelt es sich bei den eingesetzten Stoffen um Partikel eines hohen Härtegrads z.B. Korund (Al_2O_3) oder Siliziumkarbid (SiC). Des Weiteren werden beim Druckwasserabstrahlstrahlen zwei Methoden, Injektion und Suspension, verwendet. Abbildung 3.1 skizziert das Prinzip der Wasserstrahltechnik.

Die Abbildung 3.2 gibt eine Übersicht über die Antriebsarten, die zum ordnungsgemäßen Betrieb der Anlage nötig sind. In dieser Grafik wird außerdem deutlich, dass es in der Fertigungstechnik und speziell für das Schneiden eine Unterteilung zwischen den Methoden Druckwasserstrahl und Druckwasserabstrahlstrahl gibt. Diese benötigen Drücke von 1000bar bis 7000bar bzw. 1900bar bis 6000bar und Wassermengen zwischen $1,2\frac{\text{l}}{\text{min}}$ bis $2,8\frac{\text{l}}{\text{min}}$ bzw. $1,3\frac{\text{l}}{\text{min}}$ bis $20\frac{\text{l}}{\text{min}}$. Diese Druckniveaus und Wassermengen unterscheiden sich erheblich von den zu Reinigungszwecken eingesetzten Druckwasserstrahlen, die mit einem Druck zwischen 600bar und 1000bar und Wassermengen zwischen $5\frac{\text{l}}{\text{min}}$ und $90\frac{\text{l}}{\text{min}}$ arbeiten. Generell gibt es zwei Methoden zum Druckaufbau im Wasser. Systeme, die ihrem Zweck entsprechend große Wassermengen und kleine Druckniveaus benötigen und mit Plungerpumpen angetrieben werden und auf der anderen Seite Systeme, die einen hohen Druck und wenig Wasser benötigen, wie es bei den Schneidverfahren in der Fertigungstechnik der Fall ist.

Dank des Einsatzes neuer Materialien zur Herstellung von Hochdruckwassererzeugern sind in der Fertigungstechnik Drücke bis zu 10.000bar und Wasserstrahlgeschwindigkeiten bis zu $1000\frac{\text{m}}{\text{s}}$ erreichbar. Neben anderen, typischen Anwendungen wird der nicht abrasive Wasserstrahl im Bereich der Fertigungstechnik bei 1000bar bis 7000bar und einem Wasservolumenstrom von 1 bis $3\frac{\text{l}}{\text{min}}$ eingesetzt [Lefevre u. a., 2006].

Die neuen Entwicklungen in den Bereichen der Pumpentechnik zur Erzeugung von Hochdruckwasserstrahlen, sowie des künstlich intelligenten Systems zur Automatisierungs- und Regelungsoptimierung basierend auf KI (künstliche Intelligenz) bieten ein breites Nutzungsspektrum der Wasserstrahlschneidetechnologie an. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Nutzung der genannten Technik im Bereich der Agrartechnik, welcher im Abschnitt 2.3 näher behandelt wird.

3.1.3 Physikalische Grundlagen der Wasserstrahltechnik

Das physikalisch-thermodynamische Verhalten des komprimierten Wassers hängt vom Niveau der Kompression ab. Für das Druckwasserstrahlen gibt es eine Divergenz des Druckniveaunkonzeptes, welches man versucht, in drei Druckstufen anzunähern [Louis, 1991].

- Niederdruckwasserstrahlen: eingeordnet zwischen 200bar bis 700bar
- Hochdruckwasserstrahlen: in einem Bereich zwischen 700bar und 1700bar
- Höchstdruckwasserstrahlen (ultra high pressure water jet): bei über 1700bar

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Drücke bewegen sich zwischen 600bar und 3200bar , weswegen die eingesetzte Methode im Folgenden der Einfachheit halber als

„Druckwasserstrahlen“ behandelt werden.

In diesen Druckbereichen ist es nicht nötig, die Bildung von Eis als Konsequenz der Dichteänderung und der des Wassers zu betrachten [Atkins u. De-Paula, 2008]. Ein ungefährender Bereich für die Arbeitsbedingungen des Wassers für dieses Projekt ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Die Bildung von Eis, die Erwärmung sowie die Komprimierbarkeit des Wassers spielen

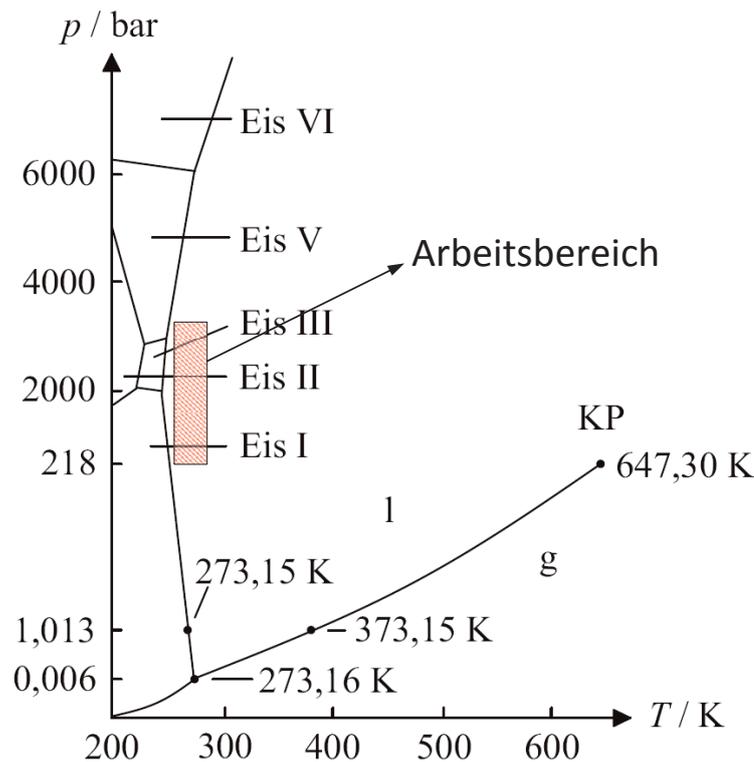


Abbildung 3.3: Phasendiagramm des Wassers (nach Atkins u. De-Paula [2008]). Die Druckachse ist nicht linear)

eine wichtige Rolle, wenn das Druckniveau 4000bar übersteigt. Wie im Phasendiagramm des Wassers (Abbildung 3.3) deutlich wird, kann es bei der Komprimierung von Wasser bei Raumtemperatur und einem Druckniveau von 8800bar zur Bildung von Eis Typ VI kommen. Das Risiko der Eisbildung wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht betrachtet, da die Eingangstemperatur des Wassers nicht unter 18°C liegt und die Kompression des Wassers 3200bar nicht übersteigt.

Normalerweise wird Wasser in den Ingenieurwissenschaften zur Vereinfachung als inkompressible Flüssigkeit betrachtet [Atkins u. De-Paula, 2008]. Die Veränderung der Dichte des Wassers als Resultat der Kompression ist in Abbildung 3.4 ersichtlich. Die Kurve stellt die prozentuelle Veränderung des Volumens des Wassers dar, die aus Formel 3.2 folgt.

$$dp = E \cdot \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.1)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{p}{E}} \quad (3.2)$$

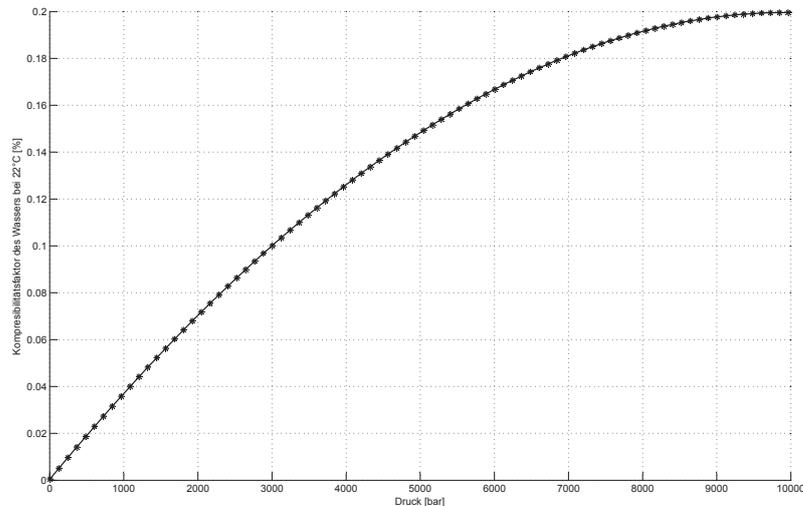


Abbildung 3.4: Kompressibilitätsfaktor des Wassers bei 22°C (nach Gleichung 3.2)

Mit E = Kompressibilitätsmodul und ρ_0 = Dichte des Wassers bei Umgebungstemperatur. Hierbei beträgt $E = 4.09 \cdot 10^9$ und $\rho_0 = 1.02103 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, beträgt die Veränderung des Volumens von Wasser bei 1000bar 4% und bei 3000bar 10%. Im Bereich der Agrartechnik werden die Komprimierbarkeit des Wassers, sowie andere thermodynamische Effekte vernachlässigt, da der resultierende Fehler für die Volumenveränderung des Wassers im untersuchten Druckbereich 3,5% nicht überschreitet.

Diese Annahme wird in der vorliegenden Arbeit mit der Ausnahme übernommen, dass für die Ermittlung der optimalen Parameter das Wasservolumen, wie in Abschnitt 6.1.2 erläutert, korrigiert wird.

Durch diese Vereinfachung, in der das Fluid als ideal newtonsches Fluid, d.h. inkompressibel, nicht viskos und reibungsfrei angesehen wird, wird die Theorie des Wasserstrahls nicht mit Navier-Stokes, sondern einer vereinfachten Form mit vernachlässigten Faktoren für die Viskosität und mit einer Reibung betrachtet, die auf die Eulersche Formel vereinfacht wird. Außerdem wird das System durch die Betrachtung als stationäre Strömung auf die Analyse von Energie und Masse vereinfacht, die mit der Bernoulligleichung beschrieben werden kann. Diese Formel besteht aus drei Komponenten: Druckenergie, kinetische Energie und potentielle Energie.

Struktur eines Wasserstrahles

Wie von Klocke u. König [2007] bzw. Kümmel [2007] beschrieben, tritt der Wasserstrahl am Düsenausgang in Kontakt mit einem anderen Medium, in diesem Fall beispielsweise Luft. Die Geschwindigkeit des Wasserstrahls am Düsenausgang wird als gleichmäßig angenommen. Mit zunehmendem Strahlabstand kommt es auf Grund der Reibung zwischen den beiden Medien an der Randzone des Strahls zu einem Energieaustausch, was zur Veränderung der Wasserstrahlgeschwindigkeit führt, wobei die Geschwindigkeit in der

Randzone abnimmt, der Strahl dadurch instabil wird und schließlich zerfällt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das Geschwindigkeitsprofil derart verändert, dass der Betrag der Geschwindigkeit in Funktion des Abstands so variiert, dass er mit größer werdendem Strahlabstand abnimmt (siehe Abbildung 3.5).

Betrachtet man die Struktur des Wasserstrahls, so stellt man fest, dass dieser sich aus

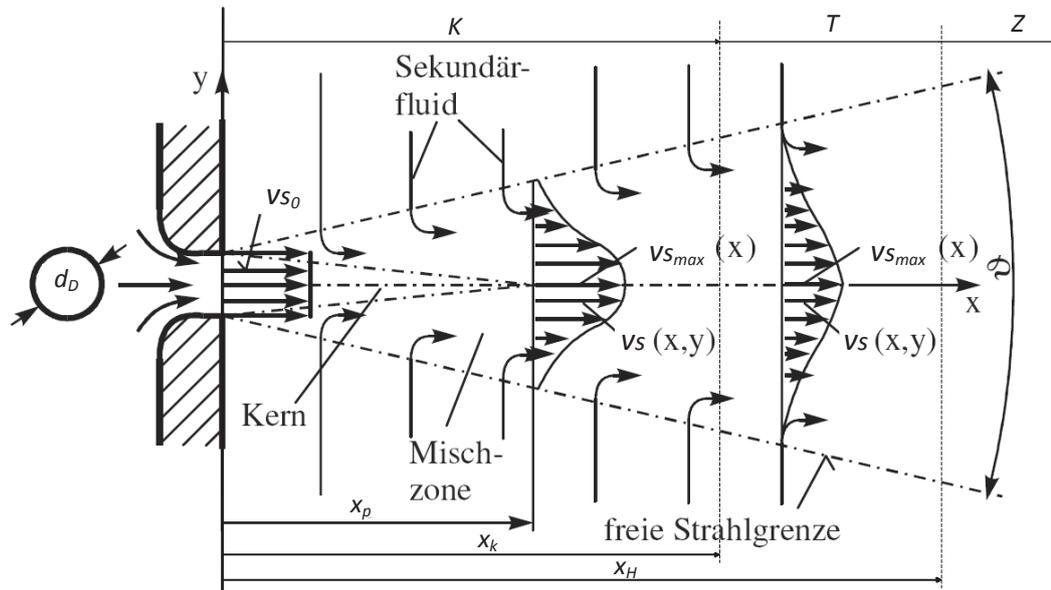


Abbildung 3.5: Freistrahlschema Quelle:Kümmel [2007]

drei Zonen zusammensetzt. Bei der ersten Zone handelt es sich dabei um eine „Kernzone“ die vom Düsenausgang ausgeht und durch den Kontakt mit dem anderen Medium in eine „Vermischungszone“ übergeht, in der Wassertropfen gebildet werden und die daher auch als „Tropfenzone“ bezeichnet wird. Die dritte Zone, die „Zerstäubungszone“ umgibt den Wasserstrahl und setzt sich aus wenig energetischen kleinen Wassertropfen zusammen, die keinerlei Schneidewirkung haben.

Die Länge der Kernzone ist hauptsächlich abhängig von der Dichte des Mediums, der Geometrie der Düse und der Turbulenz des Wassers. Einige Daten, die mit der Länge der Kernzone in Zusammenhang stehen, wurden von Sigloch [2009] ermittelt und werden in Tabelle 3.5 dargestellt. Die Länge und die Charakteristika des Wasserstrahls sind abhängig von dessen Geschwindigkeit.

Einige Forschungsarbeiten [Arai u. a., 1985, Cheroudi u. a., 1985] zielten darauf ab, die Länge der Kernzone als Funktion der Dichte des Mediums zu bestimmen, wie in Gleichung 3.3 veranschaulicht.

$$\chi_p = k_1 \cdot d_D \cdot \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_E}} \quad (3.3)$$

Hierbei stellt k_1 eine Konstante dar und ist gleich 7.15 und 15.8 (entsprechend Cheroudi u. a. und Arai u. a.), ρ_F ist die Dichte des Fluids, ρ_E ist die Dichte des Mediums, in welches der Fluidstrahl eintritt. Somit läge die Länge der Kernzone für den Fall eines Wasserstrahls, der in Luft eintritt, zwischen $200d_D$ und $500d_D$.

Das Phänomen der Wirkung eines Wasserpartikels auf eine starre Oberfläche wurde von

Tabelle 3.5: Longitudwerte des Wasserstrahls nach Sigloch [2009]

| Strahlbereich | Longitudwerte |
|--------------------------|---|
| Kern- oder Primärbereich | $\frac{\chi_p}{d_D} \approx$ 10 bis 100 |
| Kontinuierlicher Bereich | $\frac{\chi_k}{d_D} \approx$ bis 500 |
| Hauptbereich | $\frac{\chi_H}{d_D} \approx$ bis 1000 |

Haller u. a. [2002] untersucht, die eine Masche in Finite-Elemente-Analyse (FEA) entwickelten und die Eulergleichung benutzten, um den Einfluss von Partikeln einer Größe von $200\mu m$ bei einer Geschwindigkeit von $500\frac{m}{s}$ zu analysieren. Sie fanden heraus, dass die Komprimierbarkeit der Flüssigkeit eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Phänomens spielt, da sich drei Zustände entwickeln; das Auftreten einer „shock wave“ neben einer sehr hohen lateralen Geschwindigkeit „jetting“ und die Expansion von Wellen im Volumen (Körper). Bezogen auf die Form und Energie des Wasserstrahls, erzeugt ein kompakter Strahl nicht die gleichen Effekte wie ein Partikelstrahl, der Produkt des „jetting“-Phänomens ist und dessen Auswirkung sich auf der Oberfläche zeigt [Beutin, 1975, Hammelmann, 1997]. Die energetische Wirkung des Wasserstrahls, bzw. seine hydraulische Leistung ist bezogen auf die Wasserstrahlschneidetechnik sehr wichtig. In diesem Sinne präsentiert Kamel [2004] ein Energiemodell, das auf der Durchdringung des Materials in Funktion der spezifischen Energie des Wasserstrahls basiert.

Das Modell ist im Bereich der Fertigungstechnik sehr nützlich und ermöglicht die Berechnung der für das jeweilige Material notwendigen Energie, da die strukturellen Charakteristika der Materialien bekannt sind. Für das Schneiden von Agrarprodukten ist das Modell nicht anwendbar, da die Charakteristika der Materialien nicht definiert sind und zudem extrem variieren.

3.1.4 Parameter, die das Strahlschneiden beeinflussen

In klassischen Schneidprozessen, wie beispielsweise beim Zerteilen oder Spanen, hängen die Schneideparameter von der gewünschten Qualität des Schnitts, dem strukturellen Aufbau des zu schneidenden Elements und vom eigentlichen Schneidprozess selbst ab, bei dem im Allgemeinen auf das eingesetzte Schneidwerkzeug und/oder das zu schneidende Objekt folgende Parameter einwirken:

- Kraft (Druck)
- Rotationsgeschwindigkeit, bzw. Translation sowohl des Werkzeugs als auch des zu schneidenden Objekts
- Kontaktwinkel zwischen Schneidwerkzeug und zu schneidendem Objekt
- Merkmale des zu schneidenden Objekts

Ebenso wie bei den klassischen Schneidprozessen spielen die dargelegten Parameter auch beim Schneiden mit Wasserstrahlen eine Rolle, jedoch müssen bei diesem Prozess außerdem die Parameter der Erzeugung des Wasserstrahls selbst mit in die Betrachtung einbezogen werden. Für die zwei Formen des Wasserstrahls, das Druckwasserstrahlen sowie das Druckwasserabrasivstrahlen gibt es einige Schneideparameter, die beachtet werden müssen. Diese werden in Tabelle 3.6 und Abbildung 3.6 angegeben.

Sowohl die hydraulischen Parameter (Druck, Düsendurchmesser und Wassermenge), als auch die Schnittparameter, wie beispielsweise der Strahlabstand, spielen eine wichtige Rolle, da sie unmittelbar mit der Umwandlung von potentieller Druckenergie in kinetische Energie in Form des Wasserstrahls in Zusammenhang stehen und da diese letztendlich durch die Auswirkungen des Wasserstrahls oder der Partikel für den Schneidprozess verantwortlich sind.

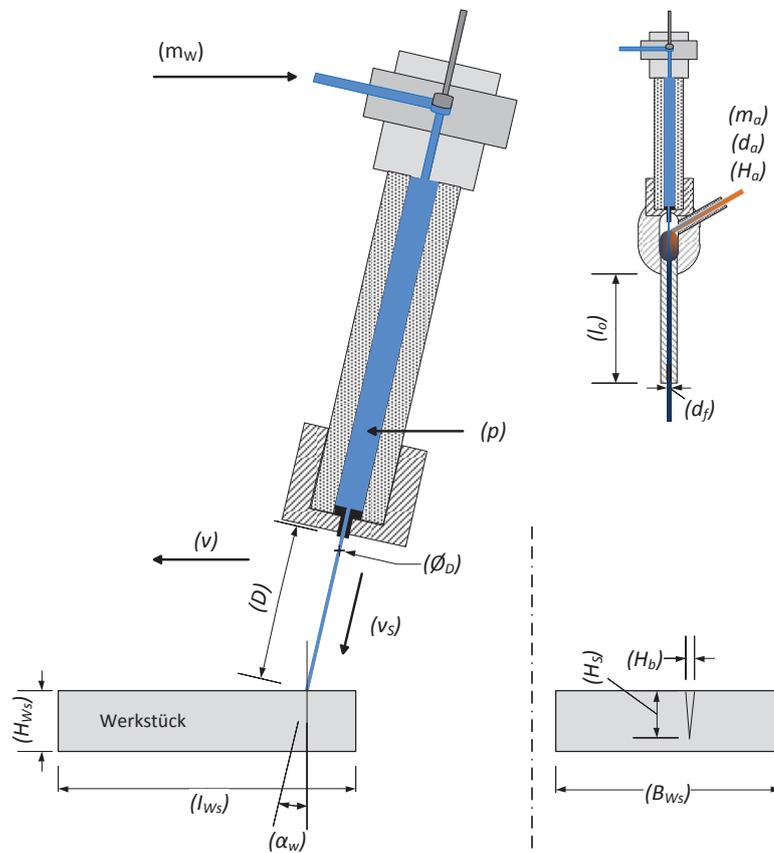


Abbildung 3.6: Schneideparameter für das Hochdruckwasserstrahlen

Tabelle 3.6: Schneideparameter eines Hochdruckwasserstrahlverfahrens

| Parameter, siehe Abb. 3.6 | |
|--|---|
| HYDRAULISCHER PARAMETER | Druck (p) Durchmesser der Düse (ϕ_D) Wassermenge ($\dot{m}_w = \frac{d(m_w)}{dt}$) |
| SCHNITTPARAMETER | Vorschubgeschwindigkeit (v) Strahlabstand (D) Schnittwinkel (α_w) Anzahl der Schnitte (n_{ws}) |
| EIGENSCHAFTEN DES ABRASIVEN STOFFES | Massenstrom des Abrasivstoffs ($\dot{m}_a = \frac{d(m_a)}{dt}$) Durchmesser der abrasiven Partikel (d_a) Härte der abrasiven Partikel (H_a) |
| MISCHUNGS- UND BESCHLEUNIGUNGSPARAMETER DER DÜSE | Fokussierdurchmesser (d_f) Fokussierlänge (l_o) |
| WERKSTÜCKPARAMETER | Härtegrad H_g Dimensionen [$(H_{Ws}); (L_{Ws}); (B_{Ws})$] |

3.2 Verfahren zur Konturerkennung

Zur Entwicklung der anatomischen Konturlinien von Agrarprodukten (Früchten), muss im Steuerungssystem ein Rückkopplungselement für den Bildverarbeitungsprozess implementiert sein, bei dem es sich in diesem Fall um einen CCD-Sensor der Firma „theimagesource“, Typ DFK 41BF02, handelt.

Die Kantenerkennung ist in der vorliegenden Arbeit ein wichtiger Bestandteil. Mit ihr wird ein Punktvektor erzeugt, welcher wiederum die Werkzeugbahn definiert und vom Roboter verfolgt wird.

Fruchtkonturerkennung

Die Erkennung der Kontur der Frucht erfolgt nach den üblichen, aus der Informatik bekannten Konturerkennungsverfahren. Stellvertretend für viele Veröffentlichungen seien hier Bässmann u. Kreyß [2004], Burger u. Burge [2006], Jähne [2004], sowie Michailovich u. a. [2007] genannt.

In dieser Arbeit wird eine Routine beschrieben, die die Bildverarbeitung und Robotertechnik integriert. Die hierfür benötigte Information ist die Kontur des Objekts, übertragen auf den Arbeitsbereich des Roboters. Diese kann auf viele unterschiedliche Arten gewonnen werden, wobei eventuell auch Informationen geliefert werden, die in diesem Fall nicht gebraucht werden. Die Methode der zweiten partiellen Ableitung des Bildes ist die einfachste Möglichkeit, die benötigten Informationen zu extrahieren. In der vorgestellten Arbeit wird

die zweite partielle Ableitung der Funktion der Farbintensität zur Kantenerkennung eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein einfaches Verfahren, welches die Aufgabe auf schnelle und effektive Weise ausführt. Für die industrielle Weiterentwicklung sollte die angewandte Methode im Rahmen des Optimierungsprozesses jedoch überdacht werden, da die Umgebungsbedingungen eine große Rolle spielen.

Die Methode der zweiten partiellen Ableitung wird mit einem Prozess zur Extraktion des Hintergrundes zu einem Verfahren zur Konvertierung des Bildes in Graustufen kombiniert, welches die Fehler minimieren muss, die durch die Charakteristika des Hintergrundes und der Beleuchtung entstehen.

Unterschiedliche Beleuchtung kann zu Veränderungen der Farbintensität des Hintergrundes führen, was bei der angewandten Methode nicht besonders störend ist, da hier bei einem homogenen Hintergrund nur die Änderungen der Farbintensität zwischen Hintergrund und Objekt detektiert wird. Es ist auf jeden Fall unerlässlich, dass es einen Unterschied bezüglich der Intensität zwischen Objekt und dem Hintergrund der Fotografie gibt. In der vorgestellten Arbeit wird mit einem blau beleuchteten Hintergrund und einer Ringbeleuchtung von der Kamera zum Objekt gearbeitet.

Die zweite Ableitung der besagten Funktion (siehe Gleichung 3.4) ist eine Punkt- oder Pixelmatrix mit (x, y) und den drei additiven Komponenten (Rot, Grün und Blau) RGB $uf = (uf_r, uf_g, uf_b)$, ebenso wie eine Matrix in Graustufen $G = (G_w)$. Im folgenden Beispiel ist nur ein Farbkanal dargestellt (Rot) $uf_r = f(x, y)$.

$$f''(uf_r) = \frac{d^2 f(x, y)}{dx^2 dy^2} \quad (3.4)$$

$$\frac{\delta^2 f(x, y)}{\delta x^2} \dots (\text{Richtung} - \mathbf{x})$$

$$\frac{\delta^2 f(x, y)}{\delta y^2} \dots (\text{Richtung} - \mathbf{y})$$

Die zweite Ableitung einer Farbfunktion, in diesem Fall eines Fotos, das durch eine Farbmatrix in jedem der RGB-Kanäle repräsentiert wird, ist mit der zweiten Ableitung jeder Richtung der Matrix dargestellt in (x, y) . Daher spricht man von der diskreten Darstellung der zweiten partiellen Ableitung der Farbfunktion (uf_r). Die Entwicklung dieses Ausdrucks in einem diskreten System und in horizontaler Richtung wird folgendermaßen dargestellt, wobei Δ der Pixelabstand ist.

$$\frac{\delta^2 f(x, y)}{\delta x^2} = \Delta^2 x \cdot f(x, y) = \Delta u \cdot f(x + 1, y) - \Delta x \cdot f(x, y)$$

Das Resultat für $\Delta = 1$ in x-Richtung zeigt die Funktion (Gl.3.5) und in y-Richtung (Gl.3.6).

$$\frac{\delta^2 f(x, y)}{\delta x^2} = f(x + 1, y) + f(x - 1, y) - 2 \cdot f(x, y) \quad (3.5)$$

$$\frac{\delta^2 f(x, y)}{\delta y^2} = f(x, y + 1) + f(x, y - 1) - 2 \cdot f(x, y) \quad (3.6)$$

Diese beiden Ausdrücke werden für die Entwicklung des Algorithmus herangezogen, der für die Konturerkennung verwendet wird. Ausgeführt wurden diese Entwicklungen mit

der Version 2008 von Visual Studio, in der auf Pixelebene gearbeitet werden kann und Funktionen, wie die Folgende verwendet werden können:

```
Returnfoto = foto.getpixel(x,y)
Red = Returnfoto.r
Green = Returnfoto.g
Blue = Returnfoto.b
```

Es handelt sich hierbei um Funktionen, aus denen die Charakteristika jedes Pixels extrahiert und in seinen roten, grünen und blauen (RGB) Bestandteilen interpretiert werden kann. Auf die gleiche Weise, wie die Farbcharakteristik gelesen werden kann, kann sie auch geschrieben werden. Hierfür wird die folgende Funktion herangezogen mit der Besonderheit, dass auch die Transparenz der Farbe betrachtet wird, wofür der Buchstabe *a* im Format *argb* steht.

```
foto.setpixel(x,y,color.fromargb(a,r,g,b))
```

Das Ergebnis kann in Abbildung 3.7 betrachtet werden, in der deutlich wird, dass unabhängig vom Hintergrund des Fotos die Kontur der Frucht festgelegt werden kann.

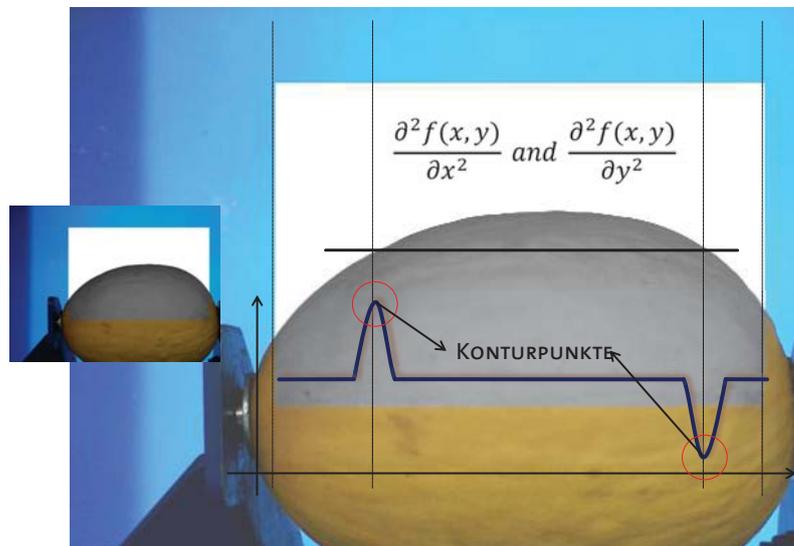


Abbildung 3.7: Erzeugung der Konturpunkte einer Frucht mittels der zweiten partiellen Ableitung einer Pixelmatrix

Fuzzy Methode zur Verbesserung der Fruchtkonturerkennung

Die mit RGB-Farbmatrizen erzielten Ergebnisse sind optimal, wenn die eingesetzte Hintergrundfarbe homogen ist. In der Praxis hängt besagter Hintergrund in starkem Maße von

der Beleuchtung ab. Ein zusätzliches Verfahren zur Korrektur von Fehlern, die auf Grund der Beleuchtung entstehen können, ist die Entwicklung eines Algorithmus, der die Effektivität der Separation der Hintergrundfarbe sicherstellt. Hierzu wird nach der Umwandlung in Graustufen das Verfahren der zweiten partiellen Ableitung, wie bereits beschrieben und in Abbildung 3.7 ersichtlich, auf das Foto angewendet. Der Algorithmus zur Umwandlung des Fotos in Graustufen wird mit Hilfe von Fuzzy Logik durchgeführt, er wird über den gesamten RGB-Raum entwickelt wie in Abbildung 3.8 (links) dargestellt. Als Kriterien dienen die Werte der Winkel des RGB-Größenvektors in Bezug auf die z-Achse (α_B) und der RG-Ebene (ξ_{RG}). Diese Winkel werden als Funktion der RGB-Komponenten ausgedrückt (siehe Gleichung 3.7 und 3.8).

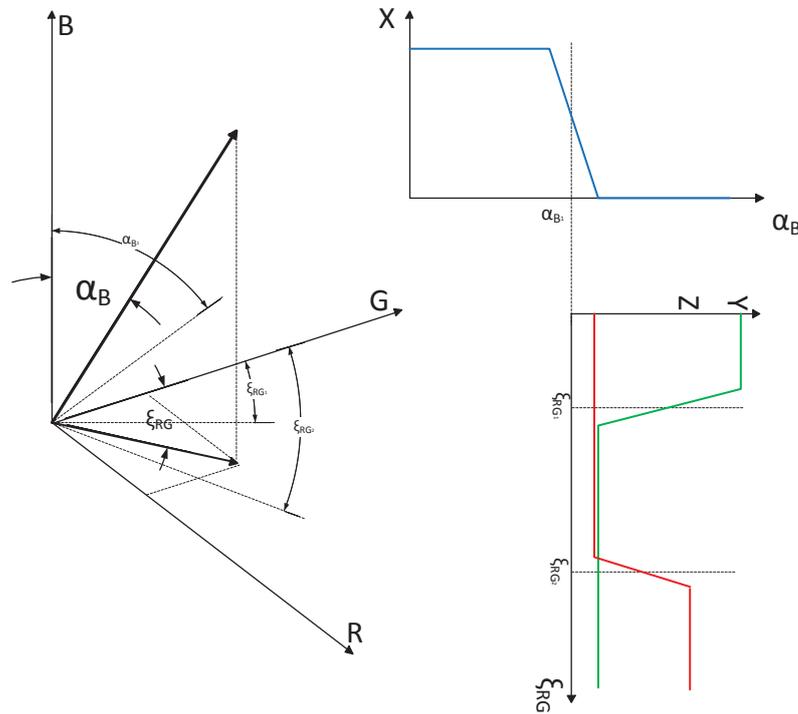


Abbildung 3.8: RGB-Raum mit entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen und Winkelübergangswerten

$$\xi_{RG} = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{r^2 + g^2}}{b} \right) \quad (3.7)$$

$$\alpha_B = \tan^{-1} \left(\frac{r}{g} \right) \quad (3.8)$$

$$G_w = X \cdot r + Y \cdot g + Z \cdot b \quad (3.9)$$

Normalerweise wird die Gleichung 3.9 benutzt, um ein Farbbild in ein Grauwertbild umzuwandeln. Das (r, g, b) -Trippel stellt die Rot-, Grün- und Blauanteile dar, und die entsprechenden Werte für (X, Y, Z) sind gemäß dem CIE XYZ-Farbraum:

$$X = 0.299; Y = 0.587; Z = 0.114$$

Im vorliegenden Prozess muss wegen der eingesetzten Hintergrundfarbe dieser eine größere Bedeutung geschenkt werden. Im vorliegenden Fall wird der Farbe Blau mehr Bedeutung beigemessen, siehe Formel 3.10, wodurch ein Grauwertbild entsteht, welches nur den blauen Kanal verwendet.

$$G_w = 0.0 \cdot r + 0.0 \cdot g + 1.0 \cdot b \quad (3.10)$$

Natürlich sind die Ergebnisse nicht die gleichen, wenn das Bild eine breite Palette von Farben enthält, so wie es bei Fotos von Früchten oft der Fall ist. Die vorgeschlagene Methode berücksichtigt die anderen Kanäle, in denen nach Tizhoosh [1998] eine Zugehörigkeitsfunktion für jede Farbe implementiert und dadurch einige Grenzen im RGB-Raum festgelegt werden. Diese Grenzen sind gegeben durch die Winkel ξ_{RG} y α_B , die gemäß den Gleichungen 3.7 und 3.8 berechnet werden. Die verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen sind linear Sivanandam u. a. [2007] (siehe Abbildung 3.8 (rechts)). Über die Zugehörigkeit eines Pixels zur Frucht oder zum Hintergrund wird dann mit einem einfachen Größenvergleich entschieden. Die Übergangswerte wurden mittels Laborversuchen bestimmt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Separation des Hintergrundes und die Konvertierung der Abbildung in Graustufen eine Funktion der Winkel ξ_{RG} y α_B ist, und die Konvertierung mit der folgenden Gleichung umgesetzt wird 3.11.

$$G_w = f(\alpha_B, \xi_{RG}) \cdot r + f(\alpha_B, \xi_{RG}) \cdot g + f(\alpha_B) \cdot b \quad (3.11)$$

Die so ermittelten Orte der Kanten werden in einem Vektor $p_k = (x_k, y_k)$ abgelegt und nach aufsteigenden x-Koordinaten geordnet [Carreño-Olejua u. a., 2009], siehe Abbildung 3.9.

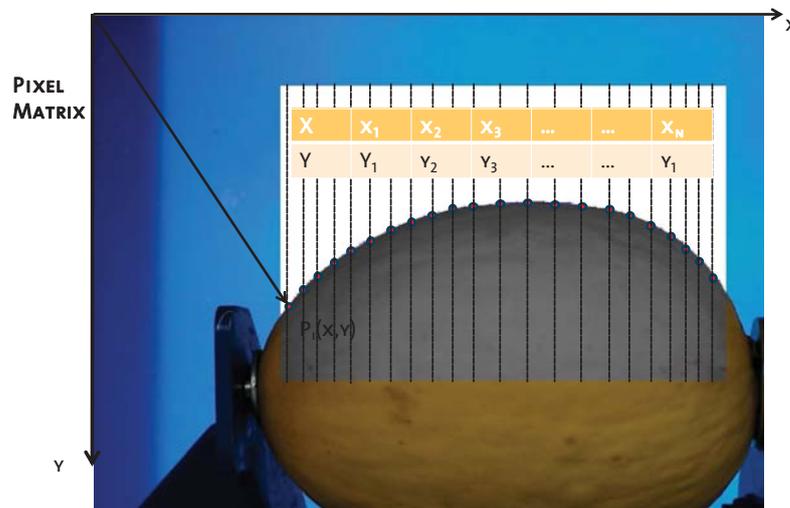


Abbildung 3.9: Punktevektor einer Fruchtkontur im Bezug zur Pixelmatrix des Kamerakoordinatensystems

3.3 Bewertung der Schnittqualität anhand der Rauigkeit

Beim nicht abrasivem Wasserstrahlschneiden sind Schnittparameter wie Schnittgeschwindigkeit (Vorschubgeschwindigkeit), Schnittwinkel, Wasserdruck bzw. Wassermenge sowie Strahlabstand bekannt. Wenn der Einfluss dieser Schnittparameter bei verschiedenen Produkten untersucht wird, werden Indikatoren gebraucht, welche je nach Prozess und Zweck einen optimalen Arbeitspunkt beschreiben.

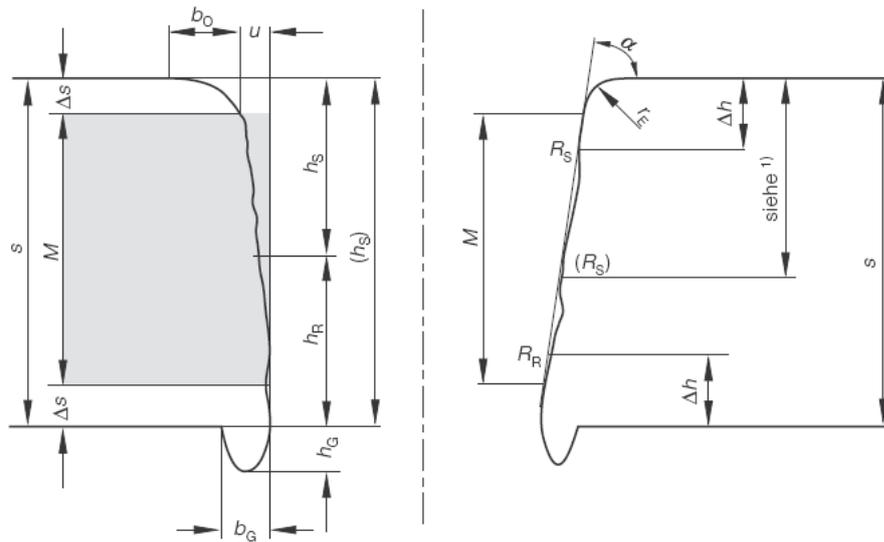
In der Norm DIN8580 [DIN, 2003a] sind die Trennverfahren im Bereich der Fertigungstechnik definiert, welche in Abschnitt 3.1.1 erklärt wurden. Unter dieser Trennverfahrensunterteilung entstand die Richtlinie VDI2906 [VDI, 1994] als Hilfsmittel für den Entwurf von Werkstücken aus Metall, die je nach verwendetem Trennverfahren, Schnitt- bzw. Trennflächenqualitätswerte hinsichtlich Geometrie, Oberflächenfeinstruktur und Änderung der Werkstoffeigenschaften liefert. Abbildung 3.10 zeigt die von der Richtlinie VDI 2906 Blatt 10 (Abrasive Wasserstrahlschneiden) angegebene Schneidekenngrößen.

Sowohl die Werte S , $\frac{h_S}{S}$, $\frac{h_R}{S}$ als auch R_S , R_R (siehe Abbildung 3.10) werden sehr oft als Schnittindikatoren genutzt. Die Rauheit R_S und R_R werden nach DIN [1998] behandelt. Die normierten Qualitätswerte und Methoden sind besonders für metallische sowie keramische Materialien erarbeitet worden.

In der Lebensmitteltechnik [Bourne, 2002] werden die Qualitätskriterien im Allgemeinen in vier Gruppen unterteilt: äußeres Erscheinungsbild (Appearance), Geschmack (Flavor), Textur (Texture) und ernährungsphysiologische Eigenschaften (Nutrition). Die drei ersten Gruppen werden als „Sensory acceptability factors“ bezeichnet, weil sie direkt über die Sinne wahrgenommen werden.

Das äußere Erscheinungsbild wird optisch wahrgenommen (Farbe, Größe, Form und Schönheit). Durch Tasten kann die Textur eines Stoffes ermittelt werden. In technischen Anwendungen werden z.B. Klang und Härte des Produktes zur Qualitätsbewertung herangezogen.

Durch den technologischen Fortschritt in der Entwicklung mechanischer und elektronischer Methoden hat die Bedeutung der Texturanalyse in den letzten Jahren stark zugenommen. Es sind nur wenige Untersuchungen für die Ermittlung der Qualität der Oberfläche von geschnittenen, nicht weiterbehandelten Obstscheiben bekannt. Es gibt jedoch eine Reihe von Untersuchungen im Bereich der Farbveränderung während der Trocknung biologischer Güter, um eine Tendenz bzw. Korrelation der Qualität des Prozesses zu bestimmen [Sturm u. Hofacker, 2009]. Deshalb werden die Oberflächenuntersuchungsmethoden aus der Fertigungstechnik verwendet, um eine Tendenz der Schnittqualität im Bezug auf die Indikatoren wie Schnittparameter, Wasser- und Energieverbrauch zu bekommen.



| | |
|---|--|
| b_o : Breite der strahlbeeinflussten Zone | r_e : Kantenradius (Strahleintrittsseite) |
| h_s : Glattschnitt | h_R : Restflächenhöhe |
| $\frac{h_s}{s}$: Glattschnittanteil | M : Messbereich zum Bestimmen von u und α |
| R_s : Schnittflächenrauheit | $\frac{h_R}{s}$: Restflächenanteil |
| R_R : Restflächenrauheit | b_G : Gratbreite |
| h_G : Grathöhe | u : Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz |
| α : Flankenwinkel | s : Werkstückdicke |
| $\Delta_s = 0.1mm$ für $s < 2mm$ und $0.2mm$ für $s \geq 2mm$ | |

Abbildung 3.10: Kenngrößen an Schnittflächen von abrasiv wasserstrahlgeschnittenen Werkstücken, nach VDI [1994] Blatt 10

Beim Wasserstrahl handelt es sich gemäß der Definition des Schneideprozesses in der Fertigungstechnik um ein Werkzeug. Der Wasserstrahl hat eine charakteristische Besonderheit, er kann durch Kontakt mit dem zu schneidenden Objekt deformiert werden. Diese Eigenschaft hängt stark von der im Wasserstrahl enthaltenen Energie seit seiner Erzeugung in der Düse ab.

Die Geometrie der Schnittfuge (Breite und Tiefe) ist neben den Materialeigenschaften von den in Tabelle 3.6 dargestellten hydraulischen Parametern abhängig.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Qualität der Schnittoberfläche abhängig ist von:

- den Materialeigenschaften
- der für den Schnitt eingesetzten Energie sowie den Eigenschaften des Wasserstrahls
- Schneideparametern

Ebenso wie bei den klassischen Schneidemethoden in der Fertigungstechnik, wie beispielsweise beim Scherschneiden, zeigt auch ein mit Wasserstrahl durchgeführter Schnitt charakteristische, genau definierte Zonen. Die erste ist dort zu finden, wo der Wasserstrahl den Schnitt mit maximaler Energie beginnt (siehe Abb. 3.10 obere Seite (h_s)). Da der Wasserstrahl danach Energie verliert und ablenkbar wird, bildet sich eine zweite Schneidezzone (siehe Abb. 3.10, untere Seite (h_R)). Die beiden resultierenden Oberflächen unterscheiden sich sehr stark in ihrer Beschaffenheit: die obere Seite weist eine sehr gute Oberfläche auf, für die untere Seite gilt das Gegenteil.

Die große Vielfalt an Parametern, die einen Einfluss auf den Prozess des Wasserstrahlschneidens haben, können leicht dazu führen, die Kontrolle über die resultierende Oberflächenqualität zu verlieren. Durch den Einsatz von intelligenten Systemen kann dies jedoch verhindert werden. Diese Art von Systemen, selbstlernende und selbstregelnde Systeme, sind in der Lage, Schnitte bei hohem Druck und mit guter resultierender Oberflächengüte durchzuführen, wenn die charakteristischen Daten des zu schneidenden Materials bekannt sind [Chakravarthy u. Babu, 1999, Henning, 2008, Parikh u. Lam, 2009, Srinivasu u. Babu, 2008].

Die Richtlinie VDI [1994] beschäftigt sich mit der Beschreibung der Schnittflächenqualität und beinhaltet in VDI [1994] Blatt 10 einen Abschnitt über das Schneiden mit abrasivem Wasserstrahl. Abbildung 3.10 zeigt die für das Schneiden mit Wasserabrasivstrahl charakteristischen Kenngrößen, die folgendermaßen bezeichnet werden:

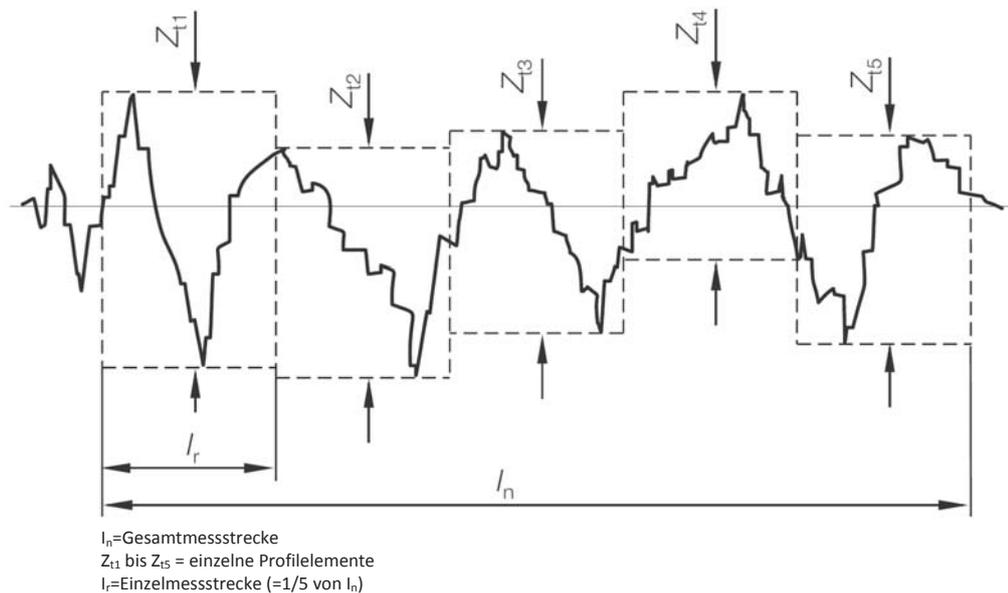


Abbildung 3.11: Charakteristische Rauheitskurve einer Oberfläche nach DIN [1998] zur Ermittlung der Rautiefe (Rz), siehe Tabelle 3.8

Drei noch nicht normierte Schnittqualitätswerte werden in der Praxis benutzt [Fritz, 2010] (Siehe Tabelle 3.7).

Der Wert R_z , bei dem es sich um einen Linienrauheitsparameter handelt, wird dazu

Tabelle 3.7: Schnittqualitätswerte nach Fritz [2010]

| | Q_1 Grob- oder Trennschnitt | Q_2 Normal- oder Mittelschnitt | Q_3 Qualitätsschnitt |
|----------------------|--|--|--------------------------------------|
| Maßtoleranz | | $\pm 0.1mm$ an der Teiloberkante | $\pm 0.05mm$ an der Teiloberkante |
| Oberflächenrauigkeit | Angaben über To- leranzen entfallen | $R_z = 20$ bis $50\mu m$ | $R_z = 10\mu m$ |
| Winkelabweichung | | 1° bis 3° | 0.5° bis 1° |

Tabelle 3.8: Linienrauheitsparameter nach DIN [1998]

| Parameter | Beschreibung |
|---|--|
| Arithmetischer Mittelrauwert Ra [μm] | Arithmetischer Mittelwert der Beträge der Profilwerte des Rauheitsprofils $Ra = \left(\frac{1}{l_r}\right) \int_0^{l_r} R(x) dx$ |
| Quadratischer Mittelrauwert Rq [μm] | Quadratischer Mittelwert der Profilwerte des Rauheitsprofils $Rq = \sqrt{\left(\frac{1}{l_r}\right) \int_0^{l_r} R^2(x) dx}$ |
| Rautiefe $Rz = Rtm$ [μm] | Arithmetischer Mittelwert der Einzelrautiefen. Die Einzelrautiefe ist die Differenz von der höchsten Profilspitze zum tiefsten Profiltal innerhalb einer Einzelmessstrecke |
| Maximale Höhe $Ry = Rp + Rv$ | Rv : Tiefe des größten Profiltals innerhalb der Gesamtmessstrecke Rp : Höhe der größten Profilspitze |

eingesetzt, die Oberflächenrauheit (siehe Abb. 3.11) zu bewerten. Dieser Wert ist neben anderen ebenso wichtigen Werten in der Norm DIN [1998] definiert. Tabelle 3.8 zeigt einige Werte für die Bewertung der Oberflächenrauheit.

Weil für die Bewertung der Oberflächenqualität von Objekten, die mit abrasivem Wasserstrahl geschnitten wurden, ein nicht standardisierter Wert genutzt wird, wird in der vorliegenden Arbeit ein zweidimensionaler Qualitätswert der Oberflächenrauheit Sa für die resultierende Oberfläche verwendet:

$$Sa = \left(\frac{1}{n_x * n_y} \right) \cdot \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} R(x_i, y_j) \quad (3.12)$$

Es wird versucht, die Richtungen x und y für die Analyse zu isolieren und die Fehler zu eliminieren, die daraus resultieren, dass nur eine oder drei Rauheitslinien zur Bestimmung des Wertes der Oberflächenrauheit herangezogen werden. Auf diese Weise kann im Kapitel der Ergebnisse und der Diskussion (siehe Kap. 6 und 6.5) der Verlauf dieses Wertes für die Oberflächenrauheit betrachtet werden, ohne die Vielzahl der Parameter zu beachten, die sich, wie im Fall von Früchten, auf das zu schneidende Material auswirken.

3.4 Bewertung der Farbe

Die Messung der Farbe landwirtschaftlicher Produkte erfolgt entsprechend den standardisierten Verfahren. Kalibrierte Kolorimeter oder andere Bilderfassungsgeräte erfassen die Farbe der Produktoberfläche und stellen diese in einer genormten Farbskala dar. Genutzt wurde die Darstellung im CIE-Lab-Farbraum, der es gestattet, den Einfluss der Schnittparameter auf die resultierenden Farbveränderungen quantitativ darzustellen, siehe Abbildung 3.12.

Die Messung der Farbe begann direkt nach dem Schnitt und wurde über einen Zeitraum von 50 Minuten regelmäßig wiederholt.

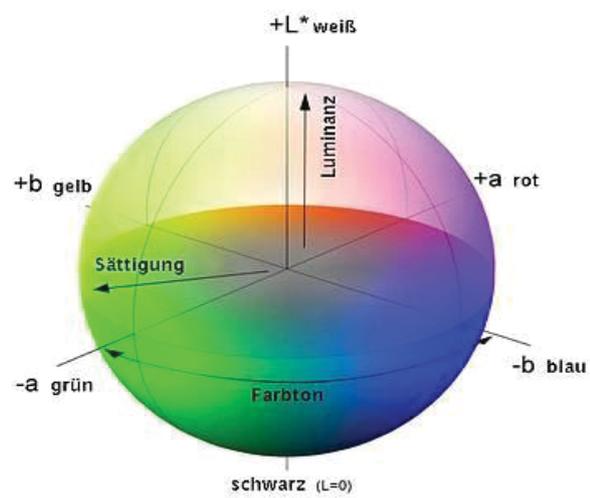


Abbildung 3.12: CIE-Lab-Farbraum. Quelle: Sturm u. Hofacker [2009]

4 Aufgabenstellung

Eine Auswertung der Literatur hat ergeben, dass mit der Wasserstrahl-Technologie ein effizientes Verfahren zur Verfügung steht, das den strengen Anforderungen an Hygiene und Flexibilität entspricht.

Bislang wurde dieses Verfahren aber nicht hinsichtlich der Verluste an Produkt, Qualität und Struktur der Oberfläche untersucht oder optimiert. Bei der Steuerung des Prozesses des Wasserstrahlschneidens wurden bislang moderne Aspekte wie Fuzzy-Mengen, Sensortechnik und künstliche Intelligenz (KI), wie lernende Systeme eingesetzt [Bimbenet u. a., 2007]. Allerdings ist der Einsatz von Bilderkennenden Systemen hingegen bislang nicht bekannt. Eine Kombination dieser Technik mit der Schneidetechnik mittels Hochdruckwasserstrahl führt zu einem anatomisch optimierten Schälprozess.

Um diese Mängel zu beheben, müssen folgende Punkte bearbeitet werden: Die anlagen-spezifischen Fragestellungen nach Bildaufnahme, Bildauswertung und daraus resultierender Führung des Wasserstrahles müssen im Hinblick auf die Optimierungsziele – Reduzierung der Massenverluste, und Verbesserung der Hygiene beantwortet werden. Weiterhin sind die produktspezifischen Auswirkungen des Schneide- und Schälprozesses – Qualität und Farbe der Schnittfläche zu untersuchen. Im Einzelnen sollen folgende Arbeiten ausgeführt werden:

- Entwicklung eines Verfahrens zur digitalen, optischen Aufnahme der Anatomie des Produktes
- Aufbereitung der gewonnenen Daten zur Führung des Wasserstrahls
- Entwicklung und Realisierung einer entsprechenden Versuchsanlage
- Erstellen von Programmen zur Steuerung der Gesamtanlage
- Ermittlung der Prozessparameter, bei denen ein Schnitt möglich ist
- Bestimmung der prozessabhängigen Produktparameter, insbesondere Qualität und Farbe der Schnittflächen
- Bestimmung der funktionalen Abhängigkeiten der Produktparameter von den Prozessparametern
- Exemplarischer Vergleich mit anderen Schnittmethoden

Die Versuche sollen beispielhaft an Äpfeln (Schnittversuche) und Melonen (Schälversuche) durchgeführt werden, da diese Produkte in ausreichender Menge und gleichbleibender Qualität zur Verfügung stehen. Weiter werden Farbe und Rauigkeit als repräsentativ für die Qualität der Schnitte betrachtet, da das äußere Erscheinungsbild das für die

Kaufentscheidung relevante Kriterium ist.

Ziel der Untersuchungen ist die Anwendung des Hochdruckschneideverfahrens, um ein landwirtschaftliches Produkt entsprechend seiner individuellen Anatomie zu schneiden oder zu schälen bzw. von unerwünschten Inhaltsstoffen zu befreien.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Schnitt- und Steuerungsparameter für das optisch gesteuerte Schälen und Schneiden landwirtschaftlicher Produkte.

Die wesentlichen Schwerpunkte dieser Arbeit sind somit:

- die Bestimmung der Schälparameter wie z.B. Wasserdruck, Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Wasserstrahlwinkel für die in Frage kommenden Produkte
- Ermittlung der notwendigen Parameter zum Erkennen von Kanten und Fehlstellen
- Entwicklung der zur Steuerung von Bilderkennung und Schneidewerkzeug notwendigen Software

5 Versuchsaufbau und -methodik

5.1 Beschreibung der Anlage

Die Versuchsanlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Eine Hochdruckpumpe zur Erzeugung des Hochdruckwasserstrahls
- Ein Wasserstrahlschneidesystem
- Ein kartesisches 3-Achsenroboter zur Schnittsteuerung und Fixierung des Produktes
- Ein System zur Bildaufnahme und -auswertung

5.1.1 Komponenten des Hochdruckwasserstrahlsystems

Systeme zur Generierung von Druckwasserstrahlen können in drei Module aufgeteilt werden:

- Filtrationsmodul
- Druckerzeugungsmodul
- Modul zur Erzeugung des Wasserstrahls

Am Eintritt des Wassers in das Druckerzeugungssystem befindet sich ein Filter zur Reinigung des zulaufenden Wassers. Verwendet werden Filter mit folgenden Größen: $FA = 1\mu m$, $FB = 0.5\mu m$ und $FC = 0.25\mu m$.

Das Druckerzeugermodul wird durch den Druckbereich und die Wassermenge charakterisiert, die zum stabilen Betrieb nötig sind.

Es werden normalerweise Druckübersetzer in Verbindung mit ölhydraulischen Antrieben eingesetzt. Typische Druckübersetzer haben ein Druckverhältnis von etwa 1 : 20, was für ein ölhydraulisches System mit einem Arbeitsdruck von 200bar, bei einem Faktor von 20, einen Wasserdruck von 4000bar ergeben würde.

Es wird eine Hochdruckpumpe Jet Cut 5.5 der Firma Jet Cut Power verwendet, die von einem ölhydraulischen System angetrieben wird. Im Hochdruckerzeuger (siehe Abbildung 5.1) wird zwischen ölhydraulischer und wasserhydraulischer Seite unterschieden, zu der auch die Wasseraufbereitung gehört. Das ölhydraulische System, das in der Abbildung dargestellt ist, setzt sich zusammen aus einer Pumpe (1), einem Filter (2), einem Überdruckventil (3), einem 4-Wege/3-Positionen Ventil (4) und einer SPS-gesteuerten Ventil-Reihe (5) zur Bewegung der synchronisierten Kolben (als Block dargestellt). Dessen Funktion ist der sequenzielle Antrieb der Zylinder Z1 und Z2. An diese Zylinder werden zwei Druckübersetzer (KP1 und KP2) gekoppelt. Das Wasser, das zuvor aufbereitet und gefiltert wurde, wird durch Ansaugen oder Kompression in die Kammern der Druckübersetzer befördert und durch den sequenziellen Antrieb der Zylinder auf das gewünschte Druckniveau

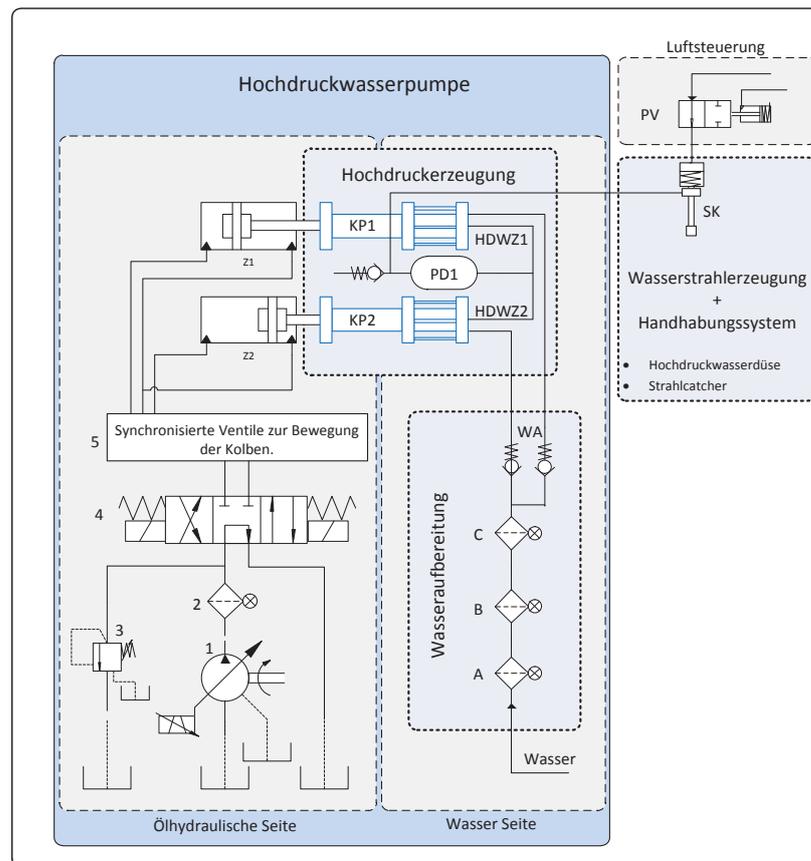


Abbildung 5.1: Schema des Prinzips einer Anlage zum Hochdruckwasserstrahlschneiden

komprimiert. Über die Zulauflinien (*HDWZ1* und *HDWZ1*) wird das komprimierte Wasser durch einen Pulsationsdämpfer (*PD1*) zur Hochdruckrohrleitung geführt. Das Modul zur Erzeugung des Wasserstrahls ist zusammengesetzt aus einem Schneidekopf, welcher mit der Hochdruckrohrleitung verbunden ist. Dieser Schneidekopf wird von einem pneumatischen on/off-Ventil gesteuert. In diesem Schneidekopf findet außerdem die Umwandlung der Druckenergie in kinetische Energie des Wasserstrahls statt. Zusätzliche Elemente eines Systems zur Wasserstrahlerzeugung sind Handhabungssysteme, wie z.B. kartesische Roboter, Strahlcatcher zum Wasserrecycling und Halterungssysteme für die zu schneidenden Objekte. Tabelle 5.1 zeigt die technischen Daten des Systems.

5.1.2 Ölhydraulisches System

Das ölhydraulische System arbeitet bis zu einem Druck von 210bar , der Antrieb erfolgt durch eine regelbare Axialkolbenpumpe. Der hydraulische Antrieb wird durch eine SPS von Fanuc gesteuert. Er wird aus Sicherheitsgründen abgeschaltet, wenn im Hochdruckwassersystem (siehe Abschnitt 5.1.3) ein Druck von 3000bar überschritten wird.

Tabelle 5.1: Technische Daten des Hochdruckwasserstrahlsystems (Pumpe, ölhydraulischer Antrieb und Schneidkopf)

| Merkm \ddot{a} l | Wert |
|-------------------------------------|--|
| HOCHDRUCKANTEIL | |
| Druckübersetzungsverhältnis | 1 : 20.66 |
| Plunger-Durchmesser | 11mm |
| Zylinderdurchmesser (Wasserseite) | 12mm |
| Ölhydraulischer Zylinderdurchmesser | 50mm |
| Hub | 100mm |
| Tankkapazität | 180cm ³ |
| Fördermenge | 0.6 $\frac{l}{min.}$ |
| ÖLHYDRAULISCHER ANTRIEB | |
| Motorleistung | 5.5kW |
| Fördermenge | 14.0 $\frac{l}{min.}$ |
| Druck (max.) | 210bar |
| Speichergröße | 0.7l |
| Ölvolumen | 170l |
| SCHNEIDEKOPF | |
| Max. Arbeitsdruck | 4000bar |
| Reaktionszeit | ca. 20ms „on“ 50ms „off“ je nach Düsen Typ. |
| Freier Durchgangsquerschnitt | 1mm |
| Pneumatischer Druck | 6bar Min.; 8bar Max. |
| Gewicht | 1.2kg |

5.1.3 Hochdruckwasser-System

Die Hochdruckeinheit besteht aus zwei Druckübersetzern, die von entsprechenden hydraulischen Zylindern angetrieben werden, das Wasser verdichten und abwechslungsweise fördern (siehe Abbildung 5.2). Ein Druckausgleichstank dient dem Ausgleich von Druckschwankungen, die beim Richtungswechsel der Zylinder entstehen.

Verbaut wurden Hochdruckkomponenten, wie Rohre und Verrohrungszubehör der Hersteller Maximator und Allfi mit einem Durchmesser von $\frac{1}{4}$ Zoll. Es wird ein Schneidkopf Typ III der Firma Allfi verwendet. Der Schneidkopf wird von einem pneumatisch betriebenen Kolbenantrieb geöffnet und durch Federkraft geschlossen.

Es wurden Saphirdüsen Typ 90 (siehe Abbildung 5.3) der Firma Allfi AG verwendet, mit den Durchmessern $\phi_D = [80, 100, 130, 150, 180, 200, 250, 300]\mu m$.

5.1.4 Mechanischer Aufbau

Zur Steuerung des Schneidkopfes wird ein kartesischer Roboter (x, y-Koordinatentisch) der Firma Isel Germany AG eingesetzt. Die x- und y-Achsen sind eine Kombination zweier LS4 Arrays der Firma Isel, jeweils mit 16mm Durchmesser-Kugelgewindespindel entspre-



Abbildung 5.2: Druckübersetzer einer Kolbenhochdruckpumpe

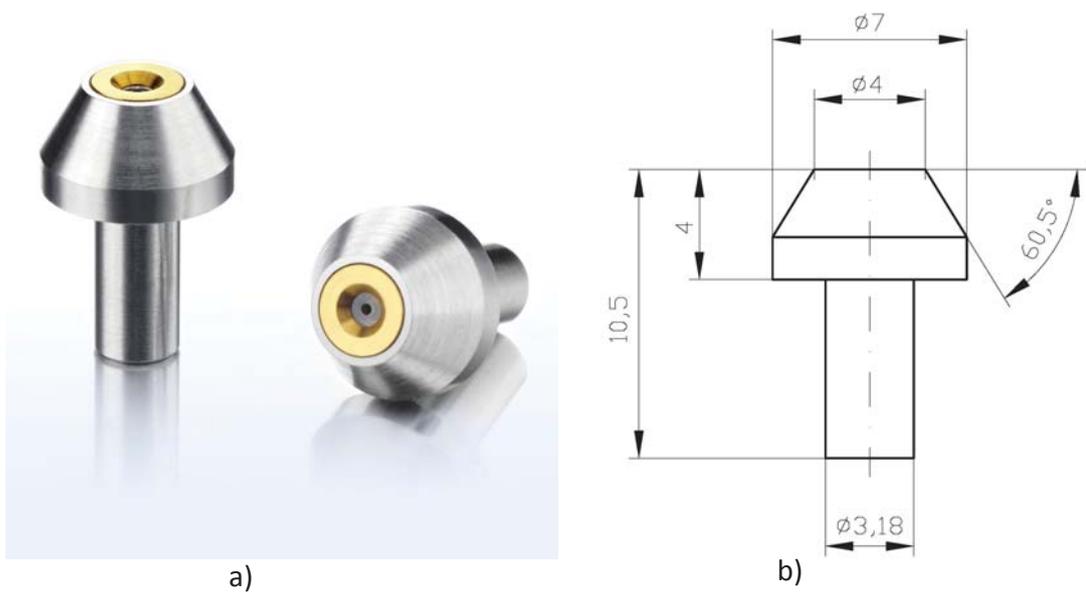
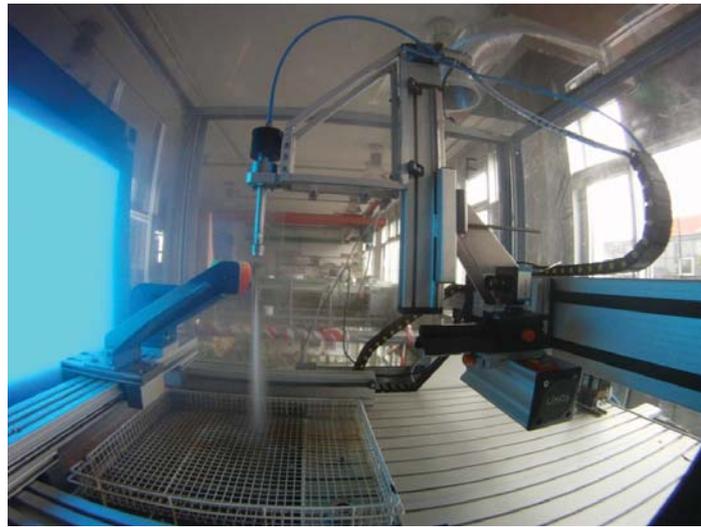
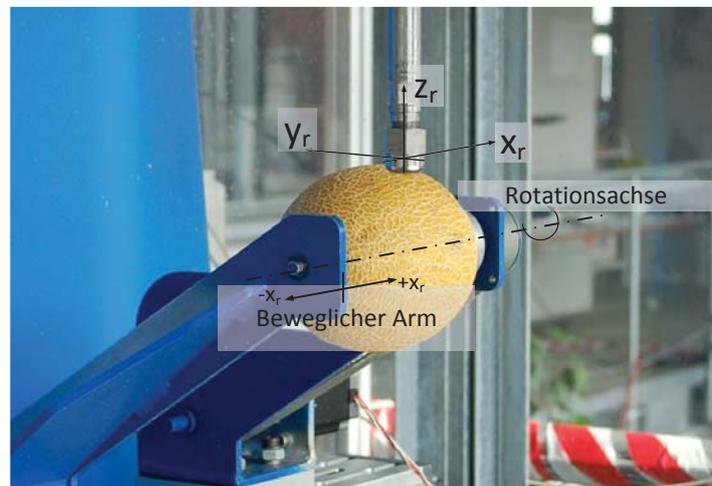


Abbildung 5.3: Saphirdüsen Typ 90. a) Foto einer Düse, b) Saphirdüsenschema

chend mit gekoppeltem Schrittmotor als Antriebselement. Eine Wiederholgenauigkeit von ca. 0.01mm auf 500mm Länge und eine Spindelsteigung von 10mm ermöglichen, die Schnittbahn sehr präzise und genau abzufahren. Der Verfahrenweg beträgt 500mm in x- und y-Achsenrichtung und 400mm in der z-Achse. Die z-Achse, die mit einer Trapezspindel entsprechend gekoppeltem DC-Getriebemotor angesteuert wird, dient dazu, den Abstand des Wasserstrahls vom Schneidkopf zum Muster festzulegen (siehe Abbildung 5.4(a)).



(a)



(b)

Abbildung 5.4: HDWS-Prüfstand zum Fruchtschälen und -schneiden. a) Kartesischer Roboter zur Steuerung des HD-Wasserstrahlschneidkopfes b) Handhabung zur Halterung und Drehung der Frucht

Zu den bereits genannten Zielen gehört die Notwendigkeit, eine Schneide- und Schälmethode zu implementieren, die „Computer Vision“ und die Bildverarbeitung beinhaltet.

Mit Hilfe der Bilderkennung sollten die Informationen gewonnen werden, die für die

präzise, der Anatomie des Produktes entsprechende Schnittführung benötigt werden. Dabei kommt der Erkennung der Fruchtgeometrie durch Konturverfahren eine zentrale Bedeutung zu.

5.1.5 Robotergesteuerter Schnitt

Die Konturpunkte p_k , die im Koordinatensystem der Kamera vorliegen, werden auf das Koordinatensystem des kartesischen Roboters $p_r = (x_r, y_r, z_r)$ mit einer Rotationsmatrix in der xy-Ebene (siehe Gleichung 5.1) übertragen. Für den Fall der Rotation von Punkten ist die Komponente z_r nicht von Bedeutung. $p_{k_0} = (x_{k_0}, y_{k_0}, z_{k_0})$ bezieht sich auf den Ausgangspunkt des Koordinatensystems der Kamera im Koordinatensystem des Roboters und der Winkel β steht für die Rotation des Koordinatensystems der Kamera, bezogen auf den Roboter.

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{k_0} \\ y_{k_0} \\ z_{k_0} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Der Punktevektor, der die Koordinaten der Kontur enthält, muss nun so transformiert werden, dass das Schneidewerkzeug auf der gewünschten Bahn den Schnitt durchführen kann.

Dazu müssen 2 Transformationen durchgeführt werden: Zum einen müssen die Bildkoordinaten, die im Koordinatensystem der Kamera vorliegen, in das Koordinatensystem des Roboters überführt werden. Weiterhin ist eine Transformation durchzuführen, die die in x,z-Koordinaten vorliegende Konturkurve in eine in x,y-Koordinaten vorliegende Schnittkurve transformiert.

Der Grund hierfür ist, dass die Frucht nach Ermittlung der Kontur um 90 Grad gedreht wird. Dies ist notwendig, weil der Wasserstrahl, der in z-Richtung wirkt, nur in x,y-Richtung verfahren werden kann, Siehe Abbildung 5.5.

Diese Transformationen werden durch Multiplikation des kamera-relativen Ortsvektors mit einer Transformationsmatrix durchgeführt. Ergebnis der Multiplikation ist der roboter-relative Ortsvektor, der vom Schneidewerkzeug abgefahren werden muss.

5.1.6 Halterung zur Aufnahme der Früchte

Parallel zur x-Achse des Roboters wurde ein Gestell montiert, welches je nach Aufgabe – Schneiden oder Schälen – eine Frucht einspannen und/oder rotieren kann. Das Rotieren der Früchte erfolgt über einen Schrittmotor. Der zu rotierenden Winkel der Früchte ergibt sich aus dem Durchmesser und der Dicke der Fruchtschale (siehe Abschnitt 5.3.4 und Abbildung 5.11(b)).

Das Gestell befindet sich im Arbeitsbereich des Roboters und ist mit der Kamera und dem Roboterkoordinatensystem ausgerichtet worden (siehe Abbildung 5.4(b)).

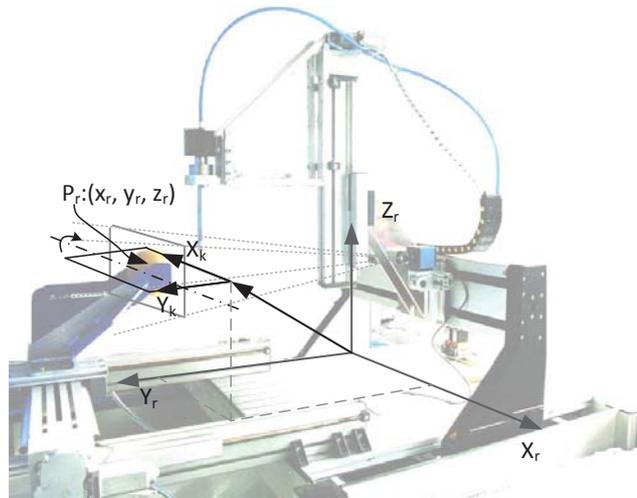


Abbildung 5.5: Koordinatensysteme von Kamera und Roboter

5.1.7 Controller (DNC - CNC)

Der Schrittmotor-Controller C142-4.1 ist ein Steuergerät für drei bipolare Schrittmotoren. In Verbindung mit einer leistungsfähigen Anwender-Software ist der Computer in der Lage, dreidimensionale Bewegungsabläufe auszuführen.

Der Controller verfügt über eine Prozesskarte, drei Leistungsendstufen sowie ein AC-Netzteil mit Überwachung der sicherheitsrelevanten Komponenten. Das Betriebssystem der Rechner ermöglicht die Programmierung des Controllers sowohl in CNC-Modus (Speicherbetrieb) als auch im DNC-Modus (Direktausführung). Hierdurch können die Daten entweder in einem statischen RAM gespeichert oder direkt umgesetzt werden.

5.1.8 Systemintegration

Ein Hochleistungscomputer dient als Prozessleitsystem der unabhängigen Systeme, wie dem hydraulischen-, Schnittsteuerungs- und Datenerfassungssystem (siehe Abbildung 5.6). Der Computer verfügt über eine entsprechende Schnittstelle, um mit der Peripherie kommunizieren zu können. Durch die RS232(1)-Schnittstelle werden die generierten Punktvektoren als Bahnfahrt bzw. Anweisungen an den Robotercontroller übertragen. Die CP-5613 PCI Karte ermöglicht durch eine Verbindung mit dem ölhydraulischen Antrieb das Einstellen der Frequenz am Motorfrequenzumrichter und dadurch die Regelung des Drucks an der Hochdruckrohrleitung. Die IEEE 1394a PCI Karte etabliert die Kommunikation zwischen dem Computer und der Kamera (CCD Sensor), um diese während des Schälprozesses anzusteuern. Eine weitere RS232 (2)-Schnittstelle kommuniziert mit dem im Computer integrierten Datenerfassungssystem Fieldpoint 1000 von National Instruments. Mit dem Datenerfassungssystem werden Digital- bzw. Analogsignale, wie zum Beispiel das Drucksignal, der Strahlabstand sowie Relais- und Endschaltersignale, gelesen und geschrieben. Die Drucksignale- bzw. Strahlabstandsignale werden mit Hilfe des Hochdrucksensors 8221 sowie dem potentiometrischen Wegsensor 8710 erfasst.

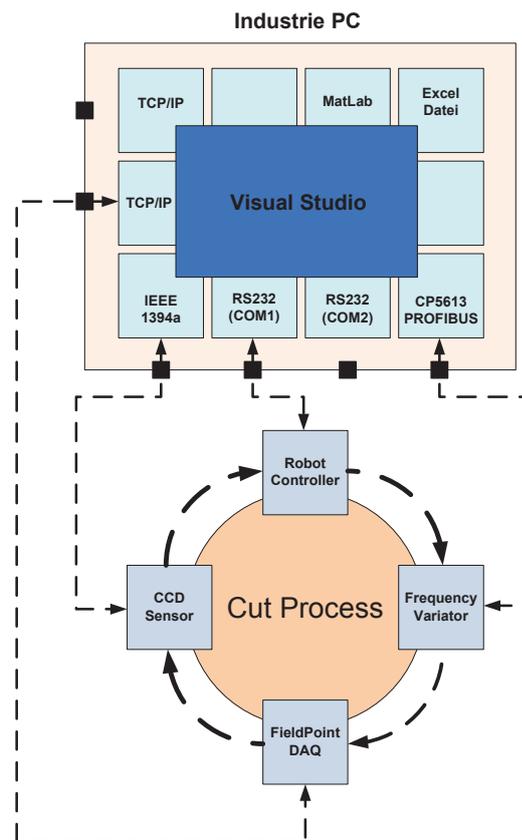


Abbildung 5.6: Kommunikationsschema des automatisierten Wasserstrahlschneidesystems

Als Integrationssoftware dient Visual Studio. Mit LabView von National Instruments werden die Daten der Fieldpoint-Datenerfassung, zu Analog- bzw. Digitalsignalen, verarbeitet. Von National Instruments ist außerdem das zusätzliche Softwarepaket Measurement Studio vorhanden, das die Regel-, Automatisierungs- und Messkomponenten von National Instruments integriert und in Visual Studio steuerbar macht. So werden die gesamten Algorithmen für Steuerung, Automatisierung und Bildverarbeitung in Visual Studio geschrieben.

5.1.9 Messsystem zur Oberflächenrauheitsbestimmung

Als optische Messmethode wird eine digitale Streifenprojektion mit Mikrospiegelprojektoren (DMDTM: Digital Micro Mirror Devices) der Firma Texas Instruments angewendet. Es handelt sich hierbei um eine Methode zur berührungslosen Oberflächenuntersuchung mit einer hohen Auflösung, Messgeschwindigkeit und -genauigkeit. Einer der großen Vorteile ist, dass es dank der digitalen Steuerung des Mikrospiegelprojektors sowie der Erzeugung und Projektion von Sinusstreifen adaptiver Helligkeit möglich ist, unterschiedliche Objekte

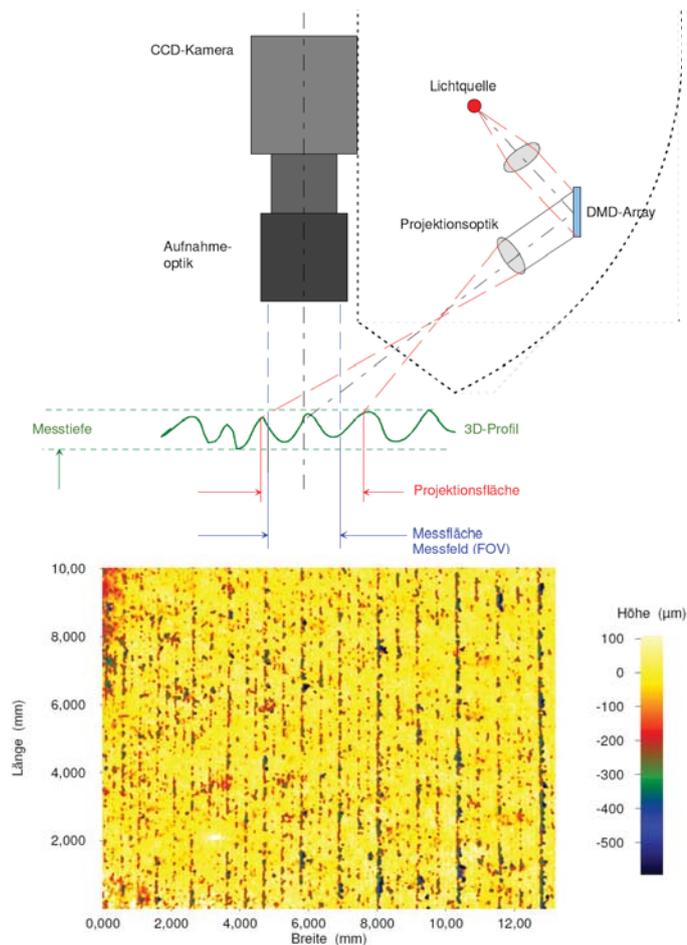


Abbildung 5.7: a) Oben: Messprinzip der digitalen Streifenprojektion mit Mikrospiegelprojektoren (DMDTM: Digital Micro Mirror Devices (Quelle: GFMesstechnik GmbH)). (b) Unten: Farbcodierte Probe einer am DMDTM aufgenommenen Apfelscheibeoberfläche.

mit unterschiedlichen optischen Oberflächeneigenschaften (lichtabsorbierende schwarze Oberfläche sowie stark reflektierende Metalloberflächen) zu messen. Abbildung 5.7 zeigt das Messprinzip der Oberflächemessmethode.

Da es sich bei den zu untersuchenden Oberflächen wegen der Farbe und der Inhaltstoffe um reflektierende Objekte handelt, ist das System zur Untersuchung der Oberflächenrauheit sehr gut geeignet.

5.2 Versuchsdurchführung

5.2.1 Versuche zur Bestimmung der Anlagenkennlinie

Die Anlagenkennlinie wurde durch mehrere Versuchsreihen ermittelt, bei denen Düsen unterschiedlicher Durchmesser ($\phi_D = [80, 100, 130, 150, 180, 200, 250, 300]\mu m$) verwendet wurden. Dabei wurde die Leistung des elektrischen Antriebes mit Hilfe eines regelbaren Frequenzumrichters zwischen 10% und 100% der Nennleistung variiert.

5.2.2 Schneide- und Schälversuche

Schneideroutinen

Die für die Rauheitsuntersuchung nötigen Oberflächen wurden per Wasserstrahl geschnitten, der mit der Software ProNC konfiguriert wurde. Die Routinen wurden mit Hilfe dieser Software so geschrieben, dass der Schneidekopf in einem gewissen Bereich auf der y-Achse hin und zurück und mit inkrementellem Fortschritt in Richtung x-Achse am Start- und Endpunkt fährt. Das Ergebnis der Schneideroutine sind in Scheiben geschnittene Früchte.

Schälverfahren

Die zu schälenden Produkte werden in eine federbelastete Vorrichtung eingebracht, sodass sie ähnlich wie ein Werkstück in einer Drehbank drehbar gelagert sind. Die Drehachse soll dabei mit der längsten Symmetrieachse der Frucht übereinstimmen.

Die Frucht wird dann in Schritten gedreht, deren Größe als Versuchsparameter einstellbar ist. Die Schrittweite beträgt zwischen 1° und 20° , abhängig von der Regelmäßigkeit der Außenkontur der Frucht. Mit einer Umdrehung um 360° wird die gesamte Außenkontur der Frucht aufgenommen.

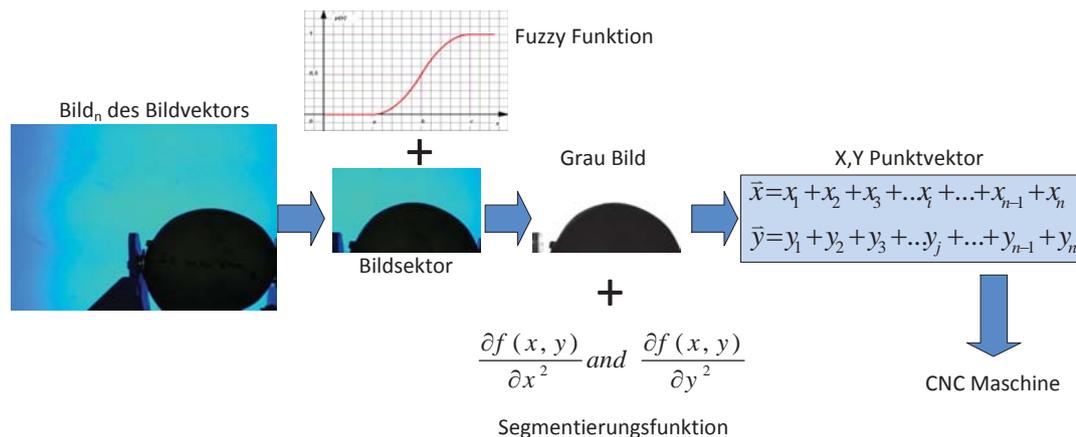


Abbildung 5.8: Schema der Erzeugung der Roboterbahnkurve zum Schälen.

Die Bahnkurve wird mit Hilfe der Bildverarbeitung ermittelt und mittels der Kommunikationsschnittstelle an den Robotercontroller gesendet. Die Bestimmung der Bahnkurve wird in Abbildung 5.8 dargestellt und erfolgt in folgenden Schritten:

- Bildaufnahme: Mit einem Computer-Algorithmus wird der am Robotercontroller angeschlossene Schrittmotor gesteuert und die Schritte des Motors mit der Bildaufnahme des am Computer angeschlossenen CCD-Sensors synchronisiert.
- Selektion eines Bereichs: Mittels eines Algorithmus auf Basis einer Fuzzy-Funktion wird der interessierende Bereich verarbeitet, sodass die Frucht bzw. Kontur vom Hintergrund getrennt und gleichzeitig durch eine Verstärkung der Grün- und Rotkanäle zu einem Grauwertbild umgewandelt wird. Das Ergebnis ist ein Grauwertbild mit exakt definierten Kanten der Früchte.
- Mit der zweiten partiellen Ableitung des Grauwertbildes wird die Kontur des Bildes ermittelt. x - und y -Koordinaten der Konturpunkte werden als Punktevektor gespeichert.
- Ein Algorithmus übersetzt jeden gespeicherten Punkt in die Programmiersprache des Robotercontrollers und sendet ihn an diesen.

Die Frucht wird dann schrittweise gedreht, während die Düse die zu jedem Schritt gehörige Bahnkurve abfährt. Da bei der Berechnung der Bahnkurve die Dicke der Schale berücksichtigt wird, bleibt eine exakt geschälte Frucht zurück.

In Carreño-Olejua u. a. [2009] wurde das Schälverfahren detailliert beschrieben.

5.2.3 Versuche zum Vergleich des Wasserstrahlschneidens mit klassischen Schneidverfahren

Um diesen Vergleich durchführen zu können, wurden Schnitte mit Wasserstrahl, mit einem handelsüblichen Küchenhobel und einem japanischen Präzisionsküchenmesser durchgeführt. Die Schnitte erfolgten dabei in der gleichen Frucht, die Schnittparameter des Wasserstrahlschnittes lagen nahe der bereits früher ermittelten optimalen Einstellung. Die erzeugten Schnitte wurden nach den Kriterien Oberflächenrauigkeit und Farbveränderung innerhalb von 50 Minuten nach dem Schnitt bewertet.

5.3 Versuchsmethodik

Weil Äpfel der Sorte Jonagold lokal ganzjährig in annähernd gleichbleibender Qualität verfügbar sind, wurde dieses Produkt für die Versuche ausgewählt. Äpfel wurden in vieler Hinsicht genau untersucht [Hund u. Stösser, 1984]. Die Zellstruktur, die die Ergebnisse der Schneidversuche beeinflusst, wurde bei der Auswahl des Schnittmaterials berücksichtigt. Denn es zeigte sich, dass die Struktur des Materials von einer Vielzahl von Produktionsbedingungen, wie z. B. Witterung und Lage, abhängt. Neben diesen Bedingungen beeinflussen auch die Position des Apfels am Fruchtstand, am Trieb und am Baum die Struktur. Daher wurden die Versuche mit Äpfeln eines Jahrganges durchgeführt, wobei immer die Cortex-Zellen aus der sonnenbeschienenen Seite der Frucht ausgewählt wurde.

Die experimentellen Arbeiten gliederten sich in 5 Abschnitte:

- Versuche zur Bestimmung der Betriebsgrenzen der Anlage
- Schnittversuche im gesamten Arbeitsbereich der Anlage mit reduzierter Anzahl der Rauheitsmessungen

- Schnittversuche in einem reduzierten Arbeits- und Parameterbereich und wiederholten Rauheitsmessungen
- Versuche zum Schälen von Früchten
- Versuche zum Vergleich mit klassischen Schnittverfahren.

Die Anlage erlaubt es, eine große Anzahl von Parametern zu variieren. Diese sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Frequenz des Antriebsstromes wurde dabei nicht aufgeführt, da sich die Frequenz für jeden Düsendurchmesser dem technologisch wichtigeren Parameter Druck p zuordnen lässt.

5.3.1 Versuche zur Bestimmung der Betriebsgrenzen der Anlage

Es werden Versuche durchgeführt, um für jeden Düsendurchmesser die minimale Antriebsfrequenz zu ermitteln. Dabei werden die Schnittergebnisse je nach erreichter Schnitttiefe als „brauchbar“ oder „unbrauchbar“ bewertet. Die zur Verfügung stehenden Düsendurchmesser und die sich aus der Frequenz ergebenden Drücke können Tabelle 5.2 entnommen werden. Der Düsenabstand betrug bei diesen Versuchen 8mm , die Vorschubgeschwindigkeit betrug $2\frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

5.3.2 Versuche mit reduzierten Rauheitsmessungen

Die Anzahl der variablen Parameter des Prozesses ist sehr hoch. Um den experimentellen und messtechnischen Aufwand zu reduzieren, wurden die Versuche so geplant, dass zwar der gesamte Arbeitsbereich, wie in Tabelle 5.2 dargestellt, abgedeckt werden konnte. Dabei wurde jedoch je Schnitt nur eine Probe zur Rauheitsmessung erzeugt, siehe Abbildung 5.9. Die zu dieser Versuchsplanung zugehörige Parametermatrix ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.2: Konfigurationsparameter zur Untersuchung des Arbeitsbereichs

| Größe | Parameter |
|---------------------------------|---|
| $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}]$ | [2 5 8 12 16 21 26 32 38 45] |
| $p[\text{bar}]$ | [700 800 1000 bis $p_{max} = f(\phi_D, f_{AP})$] |
| $D[\text{mm}]$ | [2 5 12 20 30] |
| $\phi_D[\mu\text{m}]$ | [80 100 130 150 180 200 250 300] |

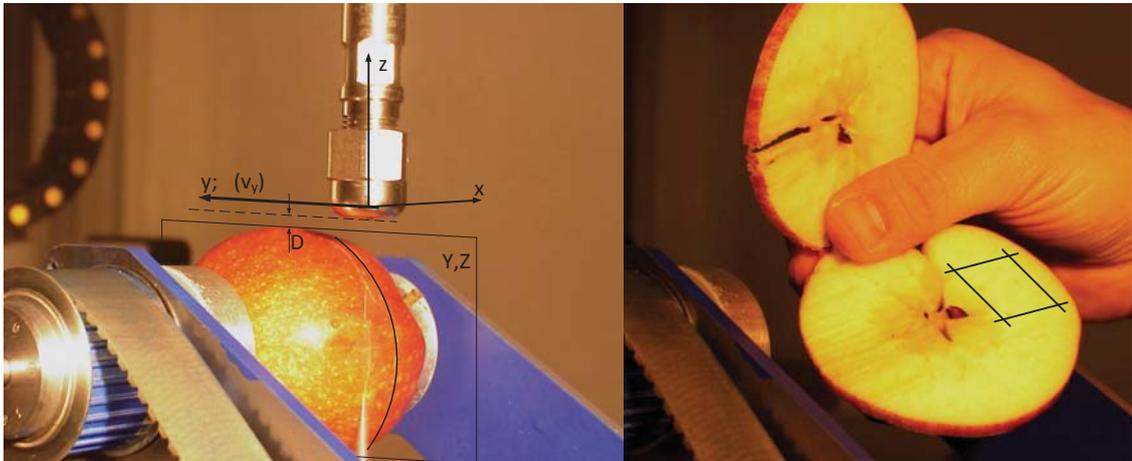


Abbildung 5.9: Durchführung der Versuche für Apfelscheiben

Tabelle 5.3: Untersuchungsblockbildung zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit unter Beachtung der Oberflächenrauheit

| | | ϕ_{D_1} | | | | | ϕ_{D_2} | | | | | ... | ϕ_{D_i} | | | | |
|-------|-----------|--------------|-------|-----|-----------|-------|--------------|-------|-----|-----------|-------|-----|--------------|-------|-----|-----------|-------|
| | | p_1 | p_2 | ... | p_{n-1} | p_n | p_1 | p_2 | ... | p_{n-1} | p_n | ... | p_1 | p_2 | ... | p_{n-1} | p_n |
| D_1 | v_1 | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_2 | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | ... | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_{n-1} | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_n | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| D_i | v_1 | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_2 | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | ... | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_{n-1} | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| | v_n | ... | | | | | ... | | | | | ... | ... | | | | |

Wobei:

v : Vorschubgeschwindigkeit

p : Wasserdruck

D : Strahlabstand

ϕ_D : Düsendurchmesser

5.3.3 Versuche im reduzierten Arbeitsbereich der Anlage

Die Versuchsergebnisse aus dem Abschnitt 5.3.2 erlauben es, einen stark verkleinerten Untersuchungsbereich zu definieren, in welchem die Abhängigkeit der Rauheit von den einzelnen Parametern sehr hoch ist. Dieser Untersuchungsbereich soll durch Variation ausgewählter Parameter abgedeckt werden, wobei pro Versuch drei Proben zur Ermittlung der Rauheit erzeugt werden sollen, siehe Abbildung 5.10. Die vorgesehene Parametermatrix ist in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.4: Parametermatrix für die Untersuchung der Oberflächenrauheit

| $D[mm]$ | $v[\frac{mm}{s}]$ | <i>Apfel₁</i> | | | | | <i>Apfel_x</i> | | | | |
|---------|-------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | p_a | p_b | p_c | p_d | p_e | p_a | p_b | p_c | p_d | p_e |
| D_A | v_k | | | ... | | | | | ... | | |
| | v_m | | | ... | | | | | ... | | |
| | v_n | | | ... | | | | | ... | | |
| D_B | v_k | | | ... | | | | | ... | | |
| | v_m | | | ... | | | | | ... | | |
| | v_n | | | ... | | | | | ... | | |

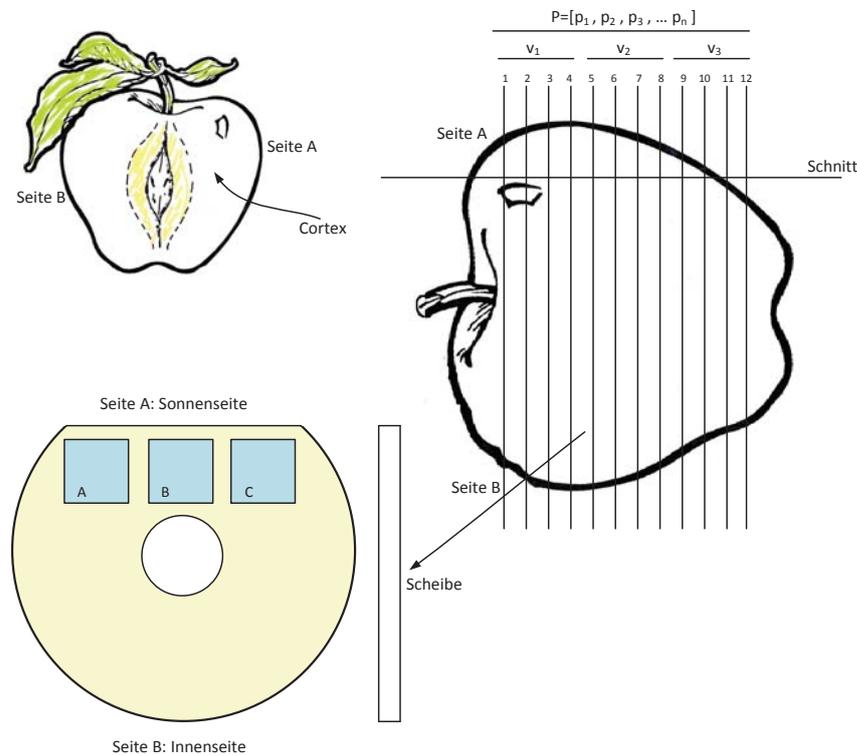


Abbildung 5.10: Schema der Vorgehensweise zur Untersuchung der Oberflächenrauheit

5.3.4 Versuche zur Untersuchung des Schälprozesses

Das in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Verfahren zum Schälen von Früchten wurde implementiert und genutzt, um die notwendigen Parameter zu bestimmen. Die Menge des abzuschälenden Materials ist eine Funktion der Anatomie und Geometrie der Frucht. Je nach Frucht muss zum Schälen eine der Schale entsprechende Menge abgetragen werden. Diese ist beispielsweise bei einer Ananas-Frucht erheblich dicker als bei einem Apfel oder einer Melone. Weiterhin ist der Durchmesser der Frucht maßgebend für den Schälprozess. Wenn vereinfachend angenommen wird, dass die Frucht einen kreisförmigen Querschnitt aufweist und keine Exzentrizität hat, so kann die Schnitttiefe in Abhängigkeit des Durchmessers der Frucht und der Anzahl der Schnitte bestimmt werden, siehe Abbildung 5.11. Die Schnitttiefe wird berechnet zu:

$$\left(\frac{\beta_n}{2}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{1 - \frac{e}{r}}{1 - \zeta \frac{e}{r}}\right) \quad (5.2)$$

$$H_{s_k} = 2\chi + \cos\left(\frac{\beta_n}{2}\right) \left(\frac{\phi_f}{2} - e\right)$$

$$\chi \approx \zeta \frac{\sin\left(\frac{\beta_n}{2}\right)}{\sin\left(90 - \frac{\beta_n}{2}\right)}$$

$$H_{s_k} = 2\zeta \tan\left(\frac{\beta_n}{2}\right) + \sin\left(\frac{\beta_n}{2}\right) \left(\frac{\phi_f}{2} - e\right) \quad (5.3)$$

$$n = \left\lfloor \frac{2\pi}{\beta_n} \right\rfloor + 1 \quad (5.4)$$

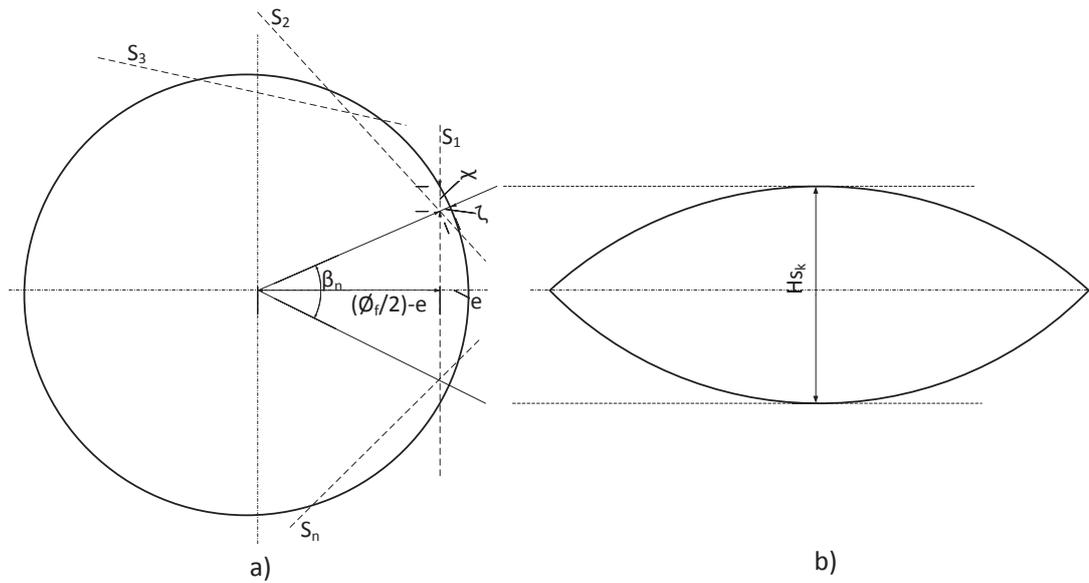
Bei der Bestimmung der Schnittanzahl werden lediglich ganze Zahlen bestimmt, da Teilschritte bei der Steuerung der Rotation der Frucht nicht zulässig sind.

H_s steht für die erreichte Schnitttiefe, H_{s_k} ist die geometrisch berechnete Schnitttiefe und wird nach dem Fruchtdurchmesser berechnet:

$$H = f(\text{Schnittparameter}, \phi_f, e)$$

Wobei ϕ_f den Fruchtedurchmesser und e die Dicke der Schale bezeichnet.

Die Tiefe des Schnitts wird in der Mitte der geschnittenen Schale gemessen, da dies der Punkt der maximalen Tiefe ist, so wie Abbildung 5.11(b) zeigt. Die Schnitttiefe wurde mit dem Durchmesser der Frucht normiert. Das Ergebniss der Versuche wurde bewertet und mit dem Schnittparameter in Zusammenhang gebracht. (siehe Tabelle 5.5).



Wobei:

- n : Schnittnummer
- S_n : Anzahl der Schnitte
- e : Dicke der Schale
- ϕ_f : Fruchtdurchmesser = $2r$
- β_n : Winkel für den Schnitt unter Beobachtung von e und ζ
- H_{S_k} Berechnete Schnitttiefe eines Schälstücks

Abbildung 5.11: Schema der Vorgehensweise zur Untersuchung eines Schälprozesses: a) Geometrisches Schema des Bildvektors eines Schälversuches b) Abwicklung eines Schalenstücks

Tabelle 5.5: Parametermatrix für die Untersuchung der Schnitttiefe

| | | | $\left(\frac{Hs}{Hs_k}\right)_1$ | $\left(\frac{Hs}{Hs_k}\right)_2$ | ... | $\left(\frac{Hs}{Hs_k}\right)_{n-1}$ | $\left(\frac{Hs}{Hs_k}\right)_n$ |
|--------------|-----------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----|--------------------------------------|----------------------------------|
| ϕ_{D_i} | p_1 | n_1 | ... | | | | |
| | p_2 | n_2 | ... | | | | |
| | ... | ... | ... | | | | |
| | p_{n-1} | n_{n-1} | ... | | | | |
| | p_n | n_n | ... | | | | |
| ϕ_{D_j} | p_1 | n_1 | ... | | | | |
| | p_2 | n_2 | ... | | | | |
| | ... | ... | ... | | | | |
| | p_{n-1} | n_{n-1} | ... | | | | |
| | p_n | n_n | ... | | | | |

Wobei:

- v : Vorschubgeschwindigkeit
- p : Wasserdruck
- n : Schnittnummer
- ϕ_D : Düsendurchmesser

6 Versuchsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Schäl- und Schneideversuche beschrieben, die im Abschnitt 5.2 eingeleitet wurden.

Zur Charakterisierung der Schneidetechnologie wurden umfangreiche experimentelle Arbeiten durchgeführt mit dem Ziel, folgende Informationen zu gewinnen:

- Ermittlung der Anlagen- und Prozessparameter (6.1)
- Bestimmung der prozessabhängigen Produktparameter, insbesondere diejenige, die Qualität und Farbe der Schnittflächen beschreiben (6.2)
- Bestimmung der funktionalen Abhängigkeiten der Produktparameter von den Prozessparametern (6.3)

Die Vielzahl der ausgeführten Versuche lässt eine Darstellung aller Ergebnisse nicht zu. Daher werden in diesem Kapitel die grundsätzlichen Ergebnisse und Zusammenhänge dargestellt, für die Einzelergebnisse wird auf den Anhang verwiesen. Die Ergebnisse wurden mit dem Programmsystem MATLAB dargestellt und ausgewertet. Dabei wurden Informationen der Homepage von Mathworks [mat] und von Angermann u. a. [2007] herangezogen.

6.1 Ermittlung der Prozessparameter

Ein wesentlicher Bestandteil der Anlage sind die Anlagenteile, die zur Erzeugung des Hochdruckwasserstrahles dienen. Ihre technische Ausführung und Aufbau wurde in Kapitel 5 beschrieben.

Die Funktion der Anlage ist durch die hydraulischen Parameter Druck und Volumenstrom sowie durch Leistungsaufnahme gekennzeichnet. Ein wesentliches Charakteristikum der Anlage ist der funktionale Zusammenhang zwischen Druck, Volumenstrom, Durchmesser der Düse und Leistungsaufnahme der Anlage.

6.1.1 Druck des Wasserstrahls

Zur Charakterisierung der Anlage wurde eine Betriebszustandsreihe eingestellt, die repräsentativ für die durchgeführten Versuche ist. Beispielsweise wurde bei einem installierten Düsendurchmesser von $80\mu\text{m}$ die Frequenz des Antriebsmotors auf $f = 23\text{Hz}$ eingestellt, da bei dieser Düse der maximale Druck erreicht wird. Wie in Abbildung 6.1 dargestellt, wird bei diesen Parametern ein Druck von 2900bar bis 3020bar erreicht. Der zeitliche Druckverlauf ist durch den konstanten Wert von 2900bar charakterisiert, dem ein Sägezahn-ähnliches Signal überlagert ist. Dieses Signal hat eine Amplitude von ca. 120bar und eine Periodendauer von 4,8 Sekunden. Das Sägezahnsignal kann der Bewegung der Kolben zugeordnet werden. Das Maximum ist erreicht, wenn ein Plunger am Ende des Hubes angelangt ist. Das Minimum wird direkt danach erreicht, wenn die Bewegung dieses Kolbens bereits beendet

ist, der zweite Kolben jedoch noch beschleunigt wird. Schwingungen anderer Frequenzen wurden im System nicht beobachtet.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden diese überlagerten Schwingungen nicht mehr berücksichtigt, da sie kleiner als 5% des Gesamtdruckes sind und keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben.

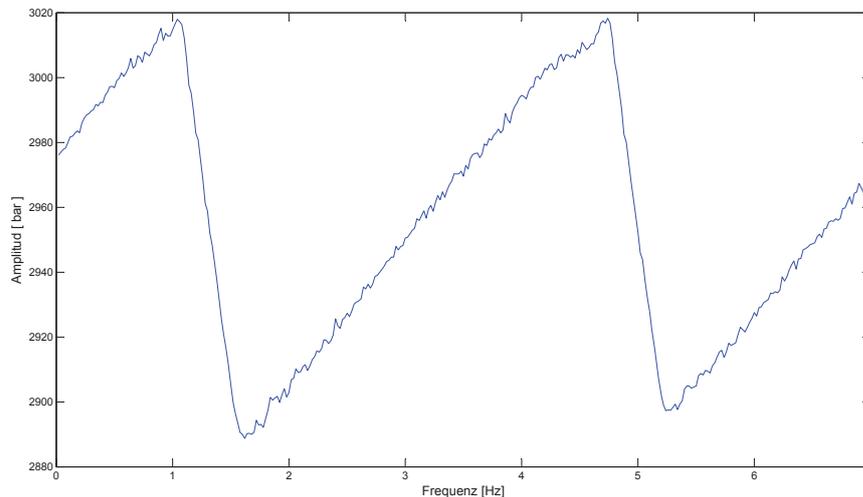


Abbildung 6.1: Beispiel eines Drucksignales bei einer Systemkonfiguration von $\phi_D = 80\mu m$ als Düsendurchmesser und $f = 23Hz$ als Frequenz am Antriebsmotor

6.1.2 Volumenstrom

Der geförderte Volumenstrom des Wassers ist proportional zur Drehzahl des Pumpenmotors. Dessen Nominaldrehzahl ist $1500\frac{U}{min}$, was einem Fördervolumen von $0,6\frac{l}{min}$ entspricht. Die Drehzahl des Motors wiederum ist über die bekannte Gleichung 6.1 mit der Frequenz des Antriebsstromes verknüpft.

$$n_s = \frac{2 \cdot f_n \cdot 60}{Polzahl} \quad (6.1)$$

Allerdings ist, wie in Abschnitt 3.1.3 dargestellt, das Volumen des Wassers im untersuchten Bereich vom Druck abhängig, sodass der Volumenstrom des Wassers aus dem Hubvolumen unter Verwendung von Gleichung 3.2 berechnet werden muss. Der Einfluss dieser Korrektur ist in Abbildung 6.2 am Beispiel der Düsendurchmesser $\phi_D = 130\mu m$ dargestellt.

Der funktionale Zusammenhang zwischen Druck, Volumenstrom und Düsendurchmesser wurde durch Versuche ermittelt, bei denen für jeden Düsendurchmesser die Kennlinie des Druckes als Funktion des Volumenstromes gemessen wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

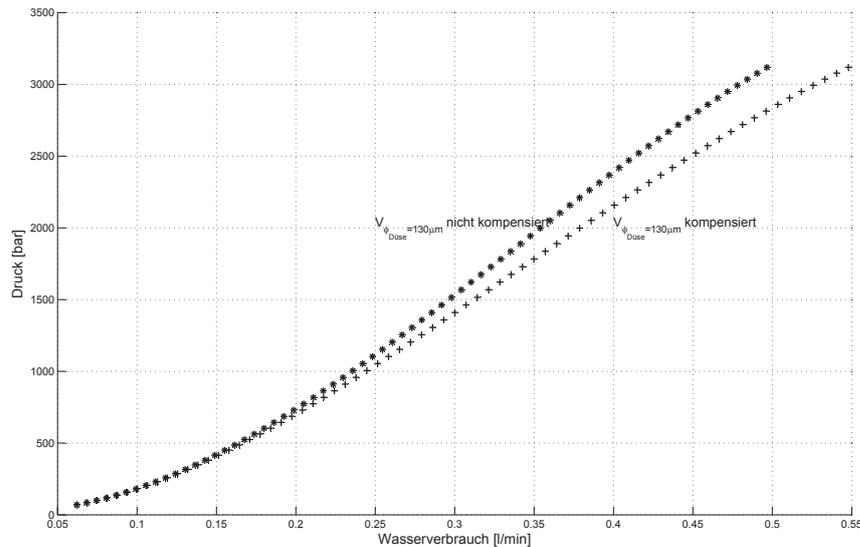


Abbildung 6.2: Wasserverbrauch ohne und mit Betrachtung der Kompressibilität des Wassers

Man erkennt, dass sich im Bereich des niedrigen Druckes ein leicht progressiver Kurvenverlauf ergibt, so wie es bei inkompressiblen Strömungen zu erwarten ist. Im Bereich des höheren Druckes ergibt sich eine Abflachung der Kurvenverläufe. Dies ist auf die Kompressibilität des Wassers, aber auch auf geringfügige Volumenveränderung der Anlage und der Rohrleitungen zurückzuführen. Charakteristisch ist der starke Einfluss des Düsendurchmessers auf den Volumenstrom. Dieser Einfluss ist naturgemäß der größeren Querschnittsfläche geschuldet, wird aber zusätzlich durch Veränderungen im Strömungswiderstand in der Düse beeinflusst.

6.1.3 Leistungsaufnahme

Die Leistungsaufnahme des Motors ist durch die allgemein gültige Gleichung 6.2 gegeben.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos(\varphi) \quad (6.2)$$

Diese Leistung wurde in der Anlage gemessen und erfasst. Der Zusammenhang zwischen dem Anlagendruck und der Leistungsaufnahme ist in Abbildung 6.4 gegeben. Wie zu erwarten, steigt die Leistungsaufnahme bei hohen Drücken und großen Düsendurchmessern stark an. Allerdings ist im Bereich von hohem Druck nur noch eine degressive Zunahme des Druckes bei Steigerung der Leistung zu beobachten. Dies ist offensichtlich der Dissipation der Leistung im System durch mechanische Effekte wie Dehnung und Volumenänderung der Anlage zuzuschreiben. Denn eine Betrachtung des Druckes als Funktion der Frequenz des Antriebsstromes – und damit der Drehzahl des Motors – ergibt den in Abbildung 6.5a dargestellten Zusammenhang: Der Druck steigt bei zunehmender Frequenz – und damit bei zunehmenden Volumenstrom – wie erwartet progressiv an, siehe auch Abschnitt 6.1.2. Daraus ist zu schließen, dass Anlagen für höhere Druckbereiche einer genaueren Auslegung bedürfen, was die Leistungsaufnahme betrifft.

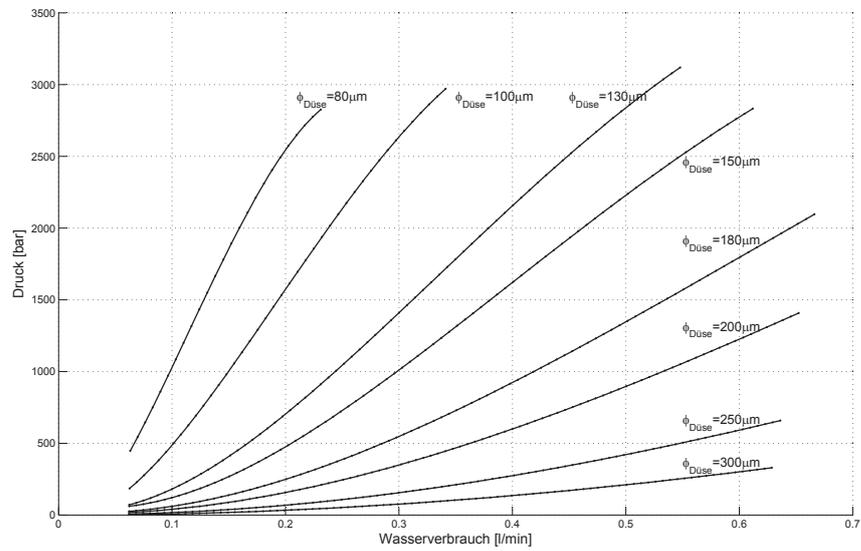


Abbildung 6.3: Wasservolumenverbrauch der gesamten Anlage, auf Atmosphärendruck bezogen

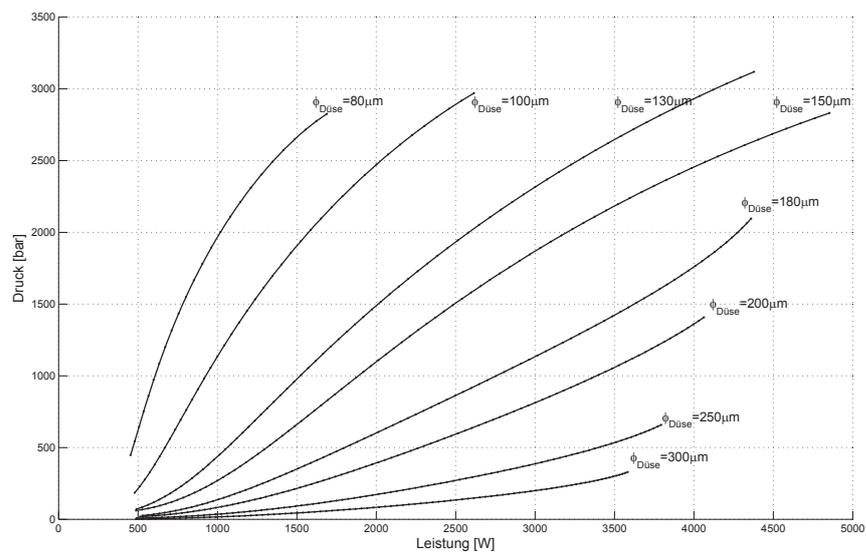


Abbildung 6.4: Leistung des Elektromotor-Antriebs vs. Druck der gesamten Anlage

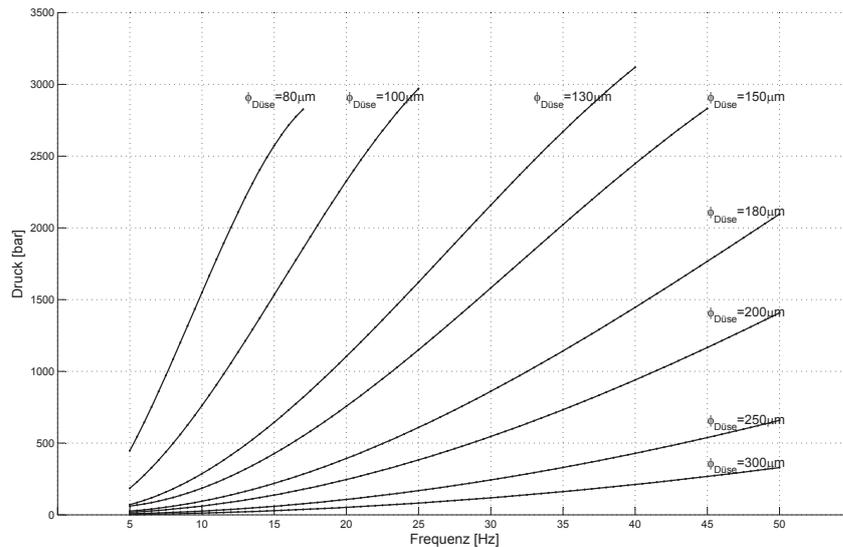


Abbildung 6.5: Druck des Systems als Funktion der Frequenz für jede der in diesem Projekt eingesetzten Düsen.

6.2 Ergebnisse der Schnittversuche

Die Versuche zur Untersuchung der Schnittleistung wurde in zwei Abschnitte unterteilt: Zum einen wurden Versuche durchgeführt, um die Betriebsgrenze der Anlage zu ermitteln. Zum andern wurde der Einfluss der Schnittparameter auf das Schnittergebnis untersucht. Die Betriebsgrenze der Anlage ist dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb dieser Grenzen ein Schnitt möglich ist, bei welchem die resultierende Oberfläche der Bahn des Wasserstrahles entspricht und nicht durch andere Effekte gestört wird.

6.2.1 Bestimmung der Betriebsgrenzen des Systems

Wie in Abschnitt 6.1 dargestellt, bilden Düsendurchmesser und Frequenz des Antriebsstromes die Parameter, die zur Gestaltung des Prozesses gewählt werden können. Allerdings können diese Parameter sinnvollerweise nur in dem Bereich eingestellt werden, der brauchbare Schnittergebnisse erzeugt. Begrenzt wird der Arbeitsbereich dadurch, dass der Strahl einen genügend hohen Energieinhalt hat, um das Material während des Schnittes abzutragen, weiterhin muss der Strahl über die gesamte Schnitttiefe kompakt sein und darf durch das Schnittmaterial nicht wesentlich abgelenkt werden. Sowohl Energieinhalt des Strahles als auch die Länge des kompakten Strahles wurden theoretisch und experimentell von Brüser [2008] und Ligocki [2005] untersucht. Daher wurden in dieser Arbeit die anlagenspezifischen Betriebsgrenzen experimentell ermittelt. Bei den dazu durchgeführten Versuchen wurde mit unterschiedlichen Düsendurchmessern und Frequenzen Schnitte entsprechend Abbildung 5.2 und 5.10 durchgeführt. „Brauchbar“ wurde ein Schnitt betrachtet, wenn der zu untersuchende Bereich glatt durchgeschnitten wurde und der Divergenzbereich des Strahles erst unterhalb auftrat. Falls der Divergenzbereich des Strahles innerhalb des Untersuchungsbereiches lag, wurde das Schnittergebnis als „unbrauchbar“ bewertet, siehe

Abbildung 6.6. Es zeigte sich, dass jedem der verwendeten Düsendurchmesser eine minima-



Abbildung 6.6: Wasserstrahlschnitt eines Apfels mit Wasserstrahleinstellungen im Übergangsbereich [$\phi_D = 100\mu m$; $p = 670\text{bar}$; $v = 20\frac{mm}{s}$; $D = 2\text{mm}$]

le Frequenz des Antriebsstromes zugeordnet werden kann, unterhalb der ein „brauchbarer“ Schnitt nicht möglich ist. Wird diese minimale Frequenz über dem Durchmesser der Düse aufgetragen, so ergibt sich eine Grenzkurve, die die Betriebsgrenze der Anlage darstellt. Dies wird in Abbildung 6.7 gezeigt. Der zulässige Betriebsbereich zum Schneiden von Äpfeln liegt oberhalb der dargestellten Kurve. Dieses Ergebnis zeigt, dass ein größerer Düsendurchmesser eine höhere Frequenz und damit einen höheren Volumenstrom erfordert. Nur dann hat der Strahl den notwendigen Energieinhalt, um den Schnitt durchzuführen. Dies spiegelt sich auch im Zusammenhang zwischen Düsendurchmesser ϕ_D und notwendigem Druck p dar, siehe Tabelle 6.1. Größere Düsendurchmesser erfordern einen höheren Systemdruck bzw. höhere Frequenzen als 50Hz am Antriebsmotor, um Schnitte durchführen zu können.

Tabelle 6.1: Lage der Betriebsgrenze der Anlage $p = f(\phi_D)$

| ϕ_D [μm] | p [bar] |
|----------------------|-----------|
| 80 | ca. 800 |
| 100 | ca. 900 |
| 130 | ca. 900 |
| 150 | ca. 900 |
| 180 | ca. 1300 |
| 200 | ca. 1350 |
| 250 | – |
| 300 | – |

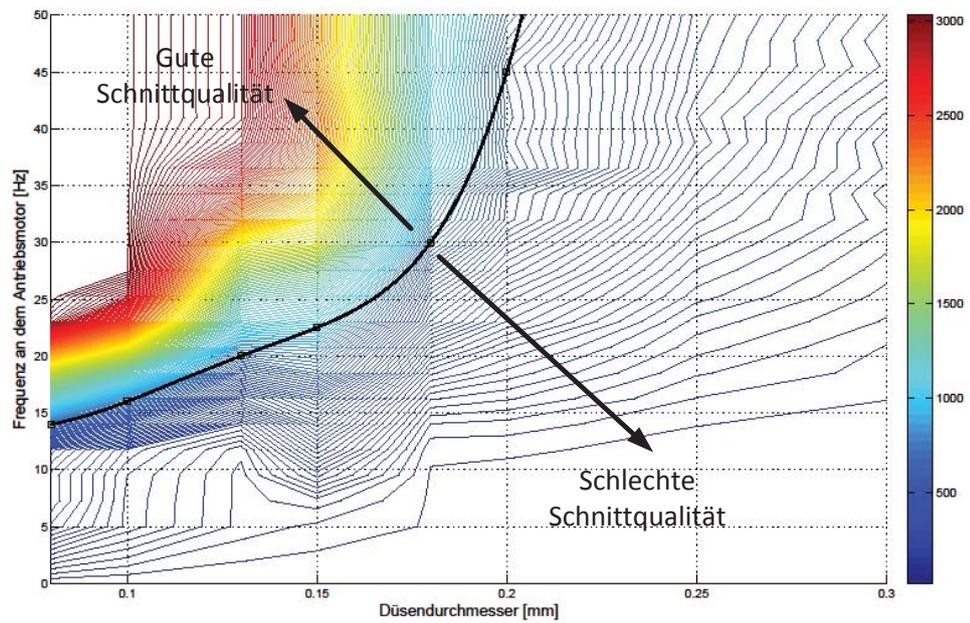


Abbildung 6.7: Übergangslinie in der Isobarenkarte zur Unterscheidung von „optimalen“ und „nicht optimalen“ Schnittparametern

6.2.2 Schnittversuche im gesamten Arbeitsbereich der Anlage

Die Ergebnisse dieser umfangreichen Versuchsreihe sind in Anhang A aufgeführt. An dieser Stelle werden die wichtigsten Ergebnisse und Zusammenhänge qualitativ dargestellt.

Die in Anhang A beigefügten graphischen Darstellungen umfassen jeweils einen Satz an

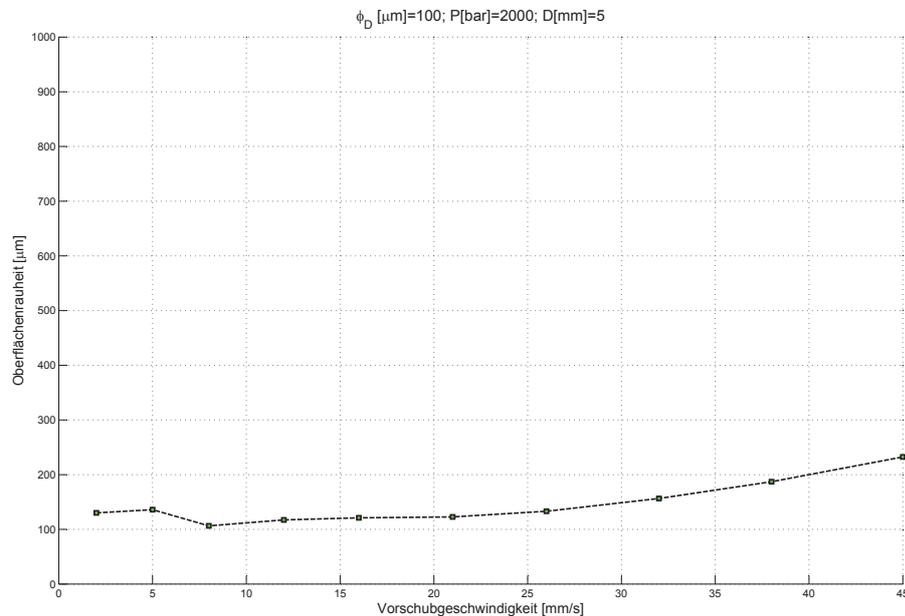


Abbildung 6.8: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit. Musterabbildung der im Anhang A dargestellten Ergebnisse.

Versuchen, die in hierarchischer Folge geordnet sind: Der Durchmesser der Düse ist das erste Ordnungskriterium, unter welchem die Versuche mit unterschiedlichen Drücken zusammengefasst sind. Für Jeden Druck wurden mehrere Düsenabstände untersucht, für welche jeweils die Oberflächenrauigkeit als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit dargestellt ist. In Abbildung 6.8 ist eine solche Funktion beispielhaft dargestellt. Die Zuordnung der Bilder zu den Prozessparametern ist in Tabelle A.1, Anhang A gegeben.

Die Ergebnisse wurden, wie in Abschnitt A.1 dargestellt, analog VDI2906 [VDI, 1994] Blatt 10 ermittelt und qualitativ bewertet. Das Ziel dieser Versuchsreihen war, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, den Untersuchungsbereich zu bestimmen, in welchem die funktionale Abhängigkeit der Schneideergebnisse von den Prozessparametern ermittelt werden sollte.

Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihen können folgende Informationen extrahiert werden:

Einfluss des Druckes auf die Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit nimmt mit wachsendem Druck ab (siehe Abbildung 6.9 und 6.10). Je höher der Druck ist, desto weniger rau ist die Oberfläche. In Abbildung 6.10 ist dies beispielhaft dargestellt und kann einem Vergleich der Abbildungen A7, A12, A17 und A22 entnommen werden.

6 Versuchsergebnisse

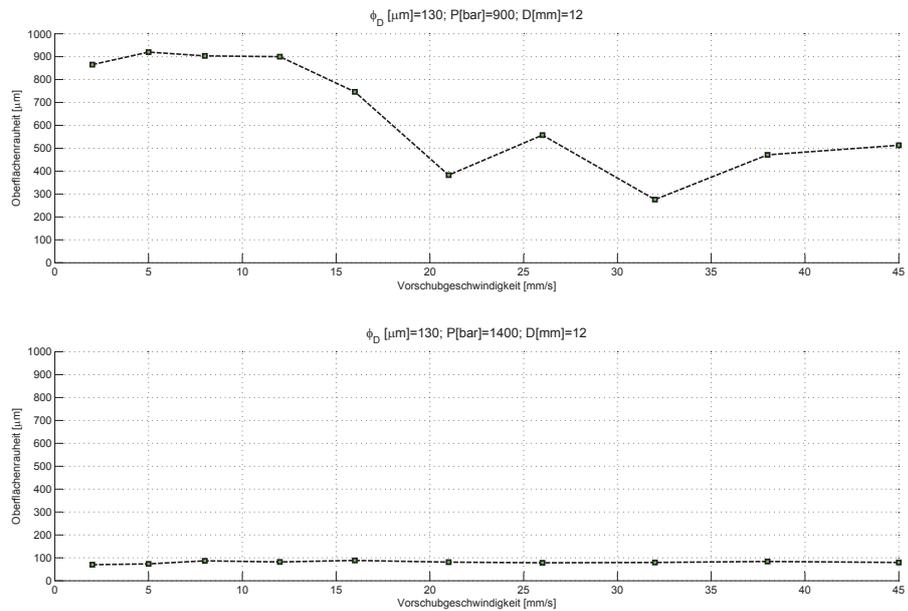


Abbildung 6.9: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und des Drucks auf die Oberflächenrauheit, Düsendurchmesser von $130 \mu\text{m}$ und ein Druck von 900 und 1400 bar

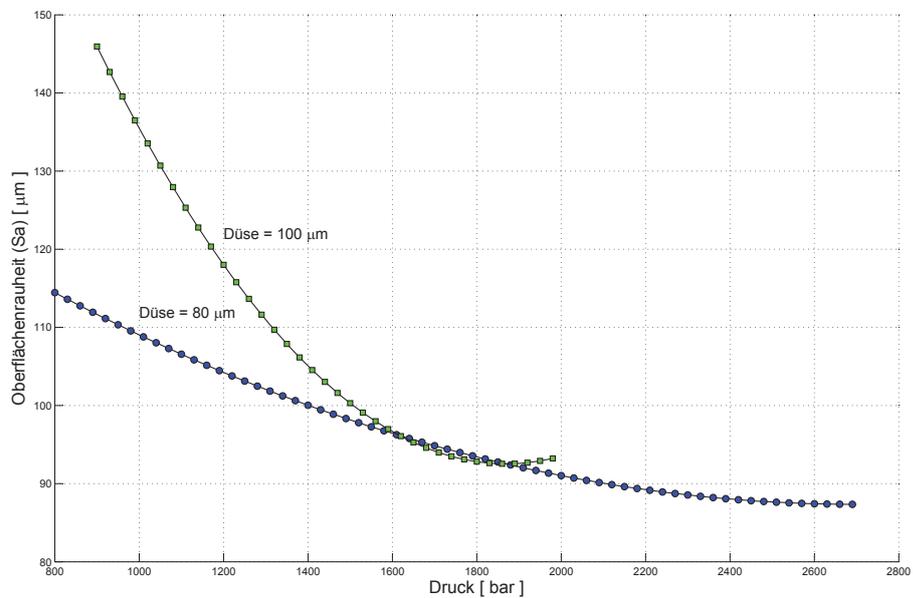


Abbildung 6.10: Oberflächenrauheit als Funktion des Druckes für einen Düsendurchmesser von $80 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 26 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Es zeigt sich weiterhin, dass sich die Oberflächenrauheit mit Drücken über 1300bar nur gering weiter verbessern lässt. Dieser hohe Druckbereich muss daher nicht weiter untersucht werden.

Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit

Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit ist im untersuchten Bereich gering, siehe Bild 6.8, deshalb wurde dieser Zusammenhang anhand von drei Stützstellen ermittelt. Für die weiteren Versuche wird daher die Zahl der zu untersuchenden Vorschubgeschwindigkeiten auf drei, nämlich 19 , 26 und $32\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, begrenzt.

Einfluss des Düsendurchmessers auf die Oberflächenrauheit

Da der Düsendurchmesser über den Volumenstrom und den Druck den Energieinhalt des Strahles beeinflusst, hat diese Größe nur einen indirekten Einfluss auf die Oberflächenrauheit. Daher werden in den Untersuchungen alle Düsen verwendet, mit denen ein Druck von 1300bar erreicht wird.

Einfluss des Strahlabstandes auf die Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit hat bezüglich des Strahlabstandes ein Optimum. Dieses Optimum liegt – abhängig vom Düsendurchmesser und der Vorschubgeschwindigkeit – zwischen 12 und 20mm . Allerdings trifft dies nur für den Druckbereich unter 1300bar zu.

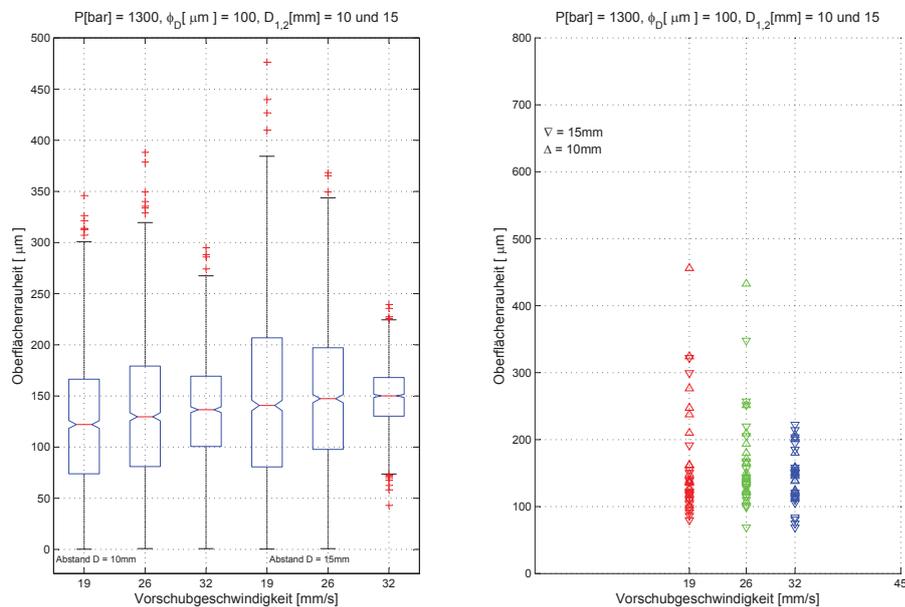
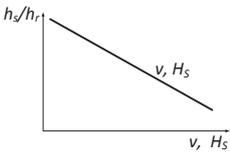
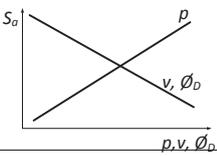
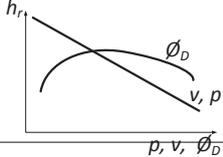
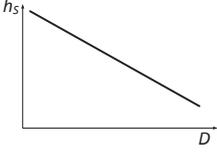


Abbildung 6.11: Einfluss des Strahlabstandes auf die Oberflächenrauheit. Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 100$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1300$ mit Schneidabstandvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

Dieses Verhalten wird darauf zurückgeführt, dass der Strahl nach einer spezifischen Länge divergent wird. Daher wird die Oberflächenrauheit bei großen Strahlabständen schlechter. Wird der Strahlabstand hingegen zu klein gewählt, ergibt sich durch Reflexions- und Ablenkungseffekte eine größere Oberflächenrauheit. Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse des Schnittprozesses mit $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 1300$. Hierbei sind Schneidabstände von $D[mm] = [10 \ 15]$ zu erkennen und Geschwindigkeiten von $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$.

In Tabelle 6.2 sind die Versuchsergebnisse entsprechend VDI2906 [VDI, 1994] qualitativ dargestellt. Diese Darstellung umfasst, wie von der Norm vorgesehen, alle Bereiche des Schnittes.

Tabelle 6.2: Generelle Auswirkung der Schneideparameter auf die Variablen der Oberfläche

| KenngroÙe | HaupteinfluÙgrößen | Effekt |
|---------------------------------|---|---|
| Glattschnittanteil | Vorschubgeschwindigkeit (v) |  |
| Rauheit des Glattschnittanteils | Druck (p) Düsendurchmesser (ϕ_D) Vorschubgeschwindigkeit (v) |  |
| Rauheit des Restschnittanteils | Druck (p) Düsendurchmesser (ϕ_D) Vorschubgeschwindigkeit (v) |  |
| Strahlbeeinflusste Zone | Düsenabstand D |  |

6.2.3 Schnittversuche im Bereich der Grenzkurve des Arbeitsbereiches

Pro Apfel wurden neun Schnitte durchgeführt, wobei je drei Schnitte mit gleichen Vorschubgeschwindigkeiten erfolgten. Jeder Schnitt erzeugte 3 Proben zur Ermittlung der Oberflächenrauheit. Jeder Versuch wurde vier Mal wiederholt. Von jedem Apfel wurde eine Kalotte abgetrennt, um einen konstanten Abstand der Düse vom Produkt zu gewährleisten.

Die Parametermatrix der Versuche ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Sie besteht aus zwei Werten für den Abstand der Düse vom Produkt, drei Werten für die Vorschubgeschwindigkeit, vier Werten für die Düsendurchmesser und – korreliert mit den Düsendurchmessern – je vier (bei $\phi_D = 80\mu m$) oder fünf Werte für den Druck.

Tabelle 6.3: Parametermatrix für die Untersuchung der Oberflächenrauheit in 6.2.2 herausgefundenen Parametern

| $D[mm]$ | $v[\frac{mm}{s}]$ | <i>Apfel₁</i> | | | | | <i>Apfel...</i> | | | | |
|---------|-------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | $p[bar]$ | | | | | $p[bar]$ | | | | |
| | | p_a | p_b | p_c | p_d | p_e | p_a | p_b | p_c | p_d | p_e |
| 10 | 19 | | | ... | | | | | ... | | |
| | 26 | | | ... | | | | | ... | | |
| | 32 | | | ... | | | | | ... | | |
| 15 | 19 | | | ... | | | | | ... | | |
| | 26 | | | ... | | | | | ... | | |
| | 32 | | | ... | | | | | ... | | |

wobei:

| Düsendurchmesser $\phi_D[\mu m]$ | Druckvektoren $p[bar]$ |
|----------------------------------|-------------------------|
| 80 | [800 900 1000 1300 –] |
| 100 | [670 800 900 1050 1300] |
| 130 | [600 750 850 1050 1300] |
| 150 | [600 750 800 1050 1300] |

In Anhang B sind alle Versuchsergebnisse aufgeführt, hierarchisch geordnet nach Düsendurchmesser, Druck, Düsenabstand und Vorschubgeschwindigkeit. Es ergaben sich für jede Parameterkombination 36 Werte zur Auswertung, die auf zweierlei Weise erfolgte: Als erstes wurden die Rohdaten als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen, siehe jeweils das Schaubild rechts in den Abbildungen im Anhang B. Diese Werte wurden statistisch ausgewertet, das Ergebnis ist jeweils im linken Schaubild aufgetragen, mit Angabe der Extremwerte und des Medianwertes. Siehe Abbildungen B1-B4, B6-B10, B12-B16, B19-B22. Die Medianwerte jeder Serie wurden zusammengefasst und als Funktion des Druckes aufgetragen, wobei der Düsenabstand als Parameter dient. Diese Darstellung befindet sich in den Abbildungen B5, B11, B17 und B23.

Eine Auswertung dieser Daten ergibt folgende Abhängigkeiten:

Einfluss des Druckes und des Düsendurchmessers auf die Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit wird mit wachsendem Druck kleiner, Abweichungen von dieser Tendenz, wie zum Beispiel in Abbildung B17 gezeigt, sind eine Folge der Streuung der Daten. Diese Streuung wird mit kleiner werdendem Druck größer. Dies ist insbesondere bei einem Düsendurchmesser von $130\mu\text{m}$ und einem Druck unter 1000bar der Fall. Größere Düsendurchmesser bewirken eine größere Oberflächenrauheit. Dabei ist zu beachten, dass bei größeren Düsendurchmessern die Geschwindigkeit des Strahles abnimmt, dieser also früher abgelenkt wird.

Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit

Ein signifikanter Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenrauheit konnte nicht ermittelt werden. Zwar zeigen die Abbildungen B5, B11, B17 und B23 eine geringe abfallende Tendenz, diese kann aber auch der Streuung der Daten geschuldet sein (siehe Abbildung 6.12 und 6.13).

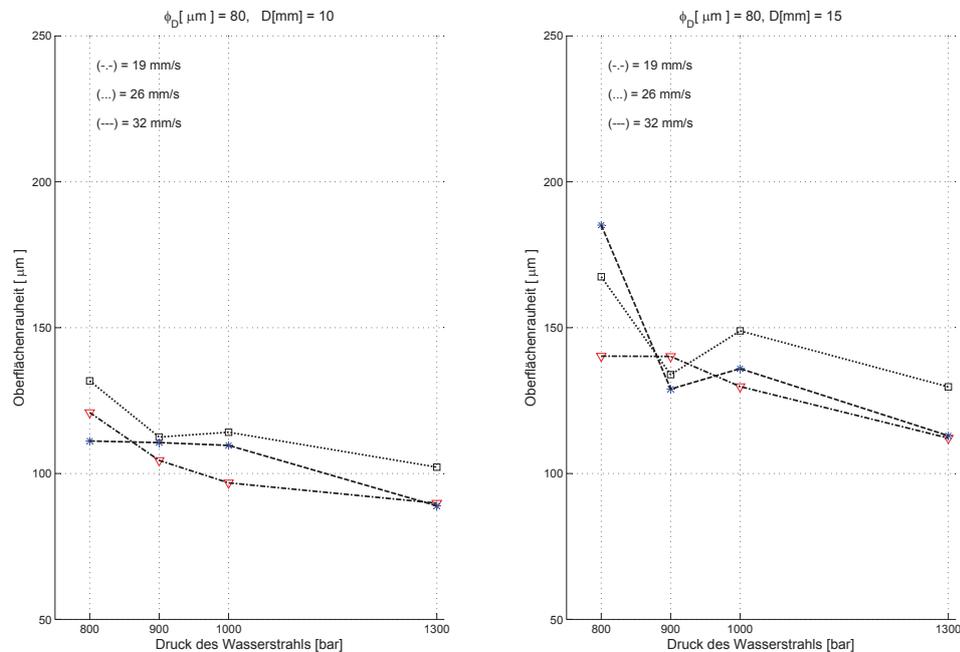


Abbildung 6.12: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = [800, 900, 1000, 1300]$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

Einfluss des Düsenabstandes auf die Oberflächenrauheit

Im beobachteten Bereich wird die Oberflächenrauheit mit wachsendem Düsenabstand größer. Die Arbeitspunkte liegen daher im oder oberhalb des in Abschnitt 6.2.2 erwähnten Minimums. Der Strahl wird bei größerem Abstand und damit größerer Strahllänge im Produkt instabil.

Bei diesen Auswertungen ist zu beachten, dass wohl eindeutige Tendenzen zu ermitteln

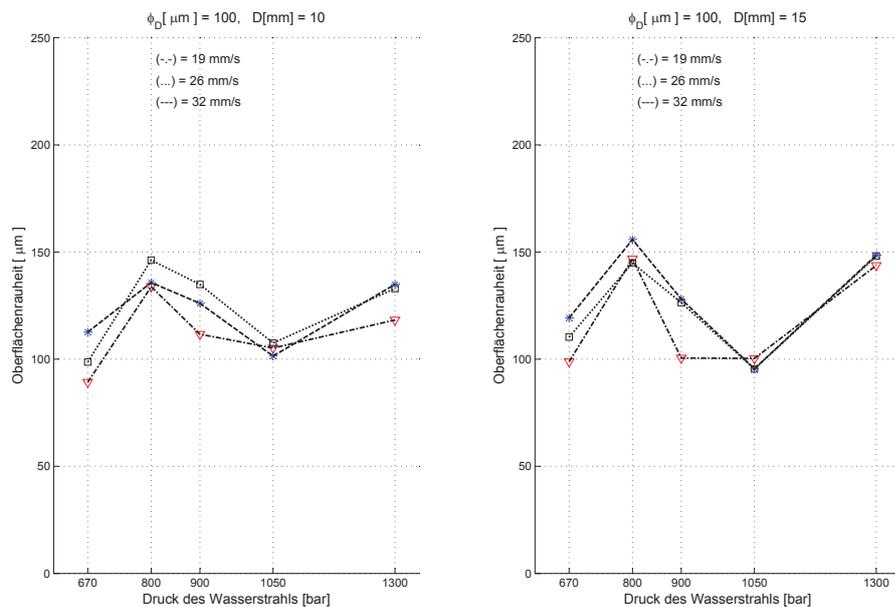


Abbildung 6.13: Ergebnis des Schnittprozess mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = [670 \ 800 \ 900 \ 1050, \ 1300]$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

sind. Gleichwohl sind die Streuungen in manchen Arbeitspunkten in der gleichen Größe wie die beobachteten Effekte. Dies liegt nicht zuletzt an der Inhomogenität der bei den Versuchen verwendeten Äpfeln. Trotzdem gestatten es die Versuchsergebnisse, eindeutige Abhängigkeiten zu formulieren und Empfehlungen auszusprechen.

6.3 Ergebnisse der Schälversuche

6.3.1 Parameter des Schälverfahrens

Aus den Versuchen, die im letzten Abschnitt beschrieben wurden, kann geschlossen werden, dass der für das Schneiden eines Apfels inklusive Schale (mit den drei Schichten: Schale – Fruchtfleisch – Schale) notwendige Druck im Übergangsbereich höher ist als für einen Schnitt im reinen Fruchtfleisch.

Im ersten Fall verliert der Wasserstrahl für den Großteil der Fälle an Kraft, wenn er mit der Schale in Kontakt kommt, da dabei ein Teil des Strahls abgelenkt wird. Dies führt wiederum zu einer Abnahme des Volumenstroms und damit letztendlich auch der Schnittleistung, siehe Abbildung 6.14. Die Härte des im zweiten Fall zu schneidenden Fruchtfleisches ist geringer, wodurch es vom Wasser leichter durchdrungen werden kann und die Leistung des Wasserstrahls weniger stark abnimmt. Die Ablenkung des Volumenstroms ist kleiner oder gleich null.

Der im Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Schneidprozess wurde dahingehend geändert, dass die Drehrichtung der Frucht umgekehrt wurde. Für diesen Fall wird die Frucht entgegen dem

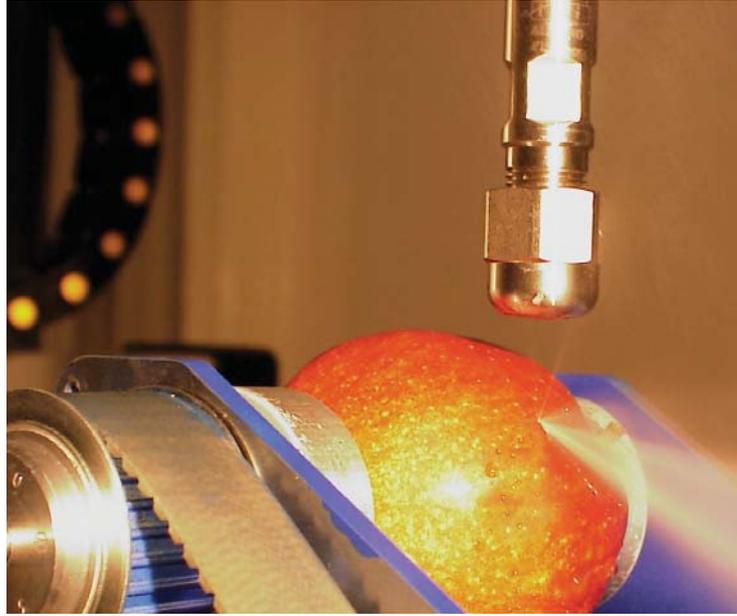


Abbildung 6.14: Ablenkung des Wasserstrahls ($p = 2000\text{bar}$, $\phi_D = 80\mu\text{m}$ und $D = 10\text{mm}$).

Uhrzeigersinn in gemäß der in Gleichung 5.4 festgelegten Proportionen gedreht, wobei der Wasserstrahl vertikal von oben direkt auf das Fruchtfleisch auftrifft.

6.3.2 Ergebnisse des Schälverfahrens

In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse dargestellt. Es lässt sich ein Übergangsbereich bezüglich des Druckniveaus erkennen, beim welchem der Schneideprozess zufriedenstellend wird. Dieses Druckniveau befindet sich etwa bei 1400 bis 1600bar. Der hier vorgestellte Versuch wurde mit der Reihenfolge Fruchtfleisch – Schale durchgeführt.

Der für das erste Schalenstück (Schnittverlauf *Schale – Pulp – Schale*) notwendige Druck beträgt je nach eingesetzter Düse 3000, 2000 und 1700bar. Die eingesetzten Düsen hatten jeweils Durchmesser von 100, 130 und 150 μm .

Die Abbildung 6.15 zeigt die Ergebnisse für den ersten Schnitt, bei dem der Wasserstrahl Schale – Fruchtfleisch – Schale schneiden musste. Es wurden die Geschwindigkeit und der Düsendurchmesser eingesetzt, die auf Grund der bisherigen Ergebnisse als optimal gefunden wurden. Der Druck wurde ausgehend von einem hohen Druckniveau so weit abgesenkt, dass die Schneidekapazität des Wasserstrahls gerade ausreichend zum Schneiden der Schale war (H_s/H_{s_k}). Der Abstand wird von der Geometrie der Frucht und dem Kolimationsrohr begrenzt. Dieser Abstand befindet sich im Bereich, in dem bei vorausgegangenen Versuchen die besten Ergebnisse erzielt wurden.

Tabelle 6.4: Ergebnisse zur Untersuchung der Schnitttiefe ($H_s[mm]$) einer mit einem $100\mu m$, $130\mu m$ und $150\mu m$ Durchmesser-Wasserstrahl geschnittenen Melone (Schnittverlauf *Fruchtfleisch – Schale*). H_{s_k} geometrisch aus der Fruchtform berechnete Größe, siehe Abbildung 5.11

| $\phi_D[\mu m]$ | $p[bar]$ | $n[1]$ | $\left(\frac{H_s}{H_{s_k}}\right)_1$ | $\left(\frac{H_s}{H_{s_k}}\right)_2$ | $\left(\frac{H_s}{H_{s_k}}\right)_3$ | $\left(\frac{H_s}{H_{s_k}}\right)_4$ | $\left(\frac{H_s}{H_{s_k}}\right)_5$ |
|-----------------|-------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 150 | 900 | 3 | 0.75 | 0.70 | 0.76 | 0.72 | 0.74 |
| | 1000 | 4 | 0.85 | 0.88 | 0.83 | 0.84 | 0.87 |
| | 1100 | 5 | 0.89 | 0.90 | 0.88 | 0.87 | 0.87 |
| | 1200 | 6 | 0.91 | ≈ 1 | ≈ 1 | 0.88 | ≈ 1 |
| | 1300 | 7 | ≈ 1 |
| | 1400 | 8 | ≈ 1 | ≈ 1 | > 1 | > 1 | > 1 |
| | 1500 | 9 | > 1 | > 1 | > 1 | > 1 | > 1 |
| 130 | 1400 | 3 | 0.75 | 0.77 | 0.76 | 0.76 | 0.74 |
| | 1500 | 4 | 0.90 | 0.88 | 0.88 | 0.94 | 0.91 |
| | 1600 | 5 | ≈ 1 | 0.94 | ≈ 1 | ≈ 1 | ≈ 1 |
| | 1700 | 6 | ≈ 1 | ≈ 1 | ≈ 1 | 0.95 | ≈ 1 |
| | 1800 | 7 | ≈ 1 | 0.93 | > 1 | ≈ 1 | > 1 |
| | 1900 | 8 | > 1 | > 1 | ≈ 1 | > 1 | > 1 |
| | 2000 | 9 | > 1 | > 1 | > 1 | > 1 | > 1 |
| 100 | 2400 | 5 | 0.87 | 0.79 | 0.88 | 0.87 | 0.87 |
| | 2500 | 6 | 0.91 | 0.89 | 0.90 | 0.88 | 0.89 |
| | 2600 | 7 | 0.92 | 0.93 | 0.92 | 0.95 | 0.94 |
| | 2700 | 8 | 0.96 | 0.90 | 0.94 | ≈ 1 | 0.92 |
| | 2800 | 9 | ≈ 1 |
| | 2900 | 10 | ≈ 1 | ≈ 1 | > 1 | ≈ 1 | ≈ 1 |
| | 3000 | 11 | > 1 | ≈ 1 | > 1 | > 1 | > 1 |



(a)



(b)

Abbildung 6.15: Schälschnitt einer Melone mit einem $130\mu\text{m}$ Durchmesser-Wasserstrahl. (a) Schnittverlauf *Schale – Pulp – Schale* (b) Ergebnis des Schnittverlaufes *Pulp – Schale*

6.4 Vergleich unterschiedlicher Schnittverfahren

Beim Vergleich des Wasserstrahlschneidens mit klassischen Schneidmethoden wurde parallel zur Untersuchung der Rauigkeit der Oberflächen für jedes Schneidverfahren die Veränderung der Farbe nach dem Schnitt der Oberfläche bestimmt.

6.4.1 Rauheit

In Abbildung 6.16(a) ist ein enormer Unterschied der gemessenen Oberflächenrauheitswerte von 111,2, 58,4 und $30,97\mu\text{m}$ für eine signifikante Anzahl an Proben zu erkennen. Auffallend ist auch die Standardabweichung der Werte, 55,03, 11,99 und $5,05\mu\text{m}$, die ebenfalls starke Unterschiede aufweisen, wie in Grafik 6.16(b) veranschaulicht, in der die Daten eine Häufigkeitsverteilung aufweisen, deren Streuung von der Streuung einer Normalverteilung (im Diagramm 6.16 mit Θ bezeichnet) abweicht. Es bleibt anzumerken, dass die für den Wasserstrahl erhaltenen Werte bei einem sehr hohen Druck von 2700bar , einer Düse mit einem Durchmesser von $100\mu\text{m}$ und bei einer Geschwindigkeit von $2\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ erreicht wurden.

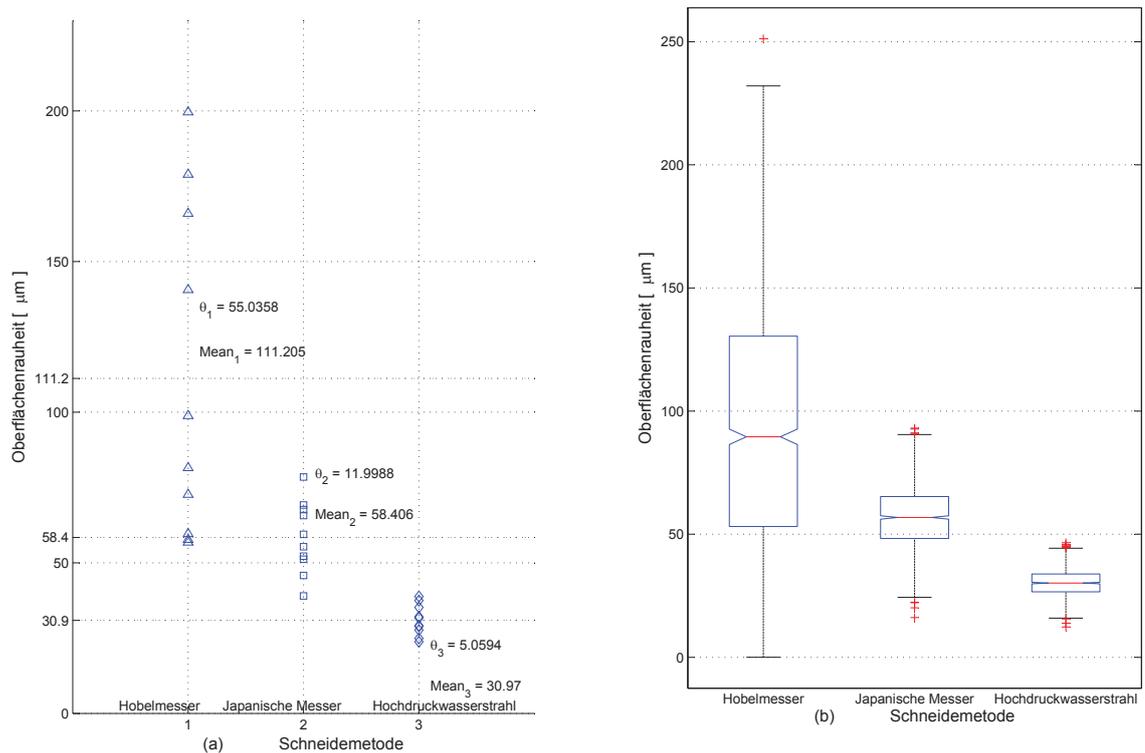


Abbildung 6.16: Analyse der Oberflächenrauheit von Apfelscheiben, welche mit drei unterschiedlichen Werkzeugen geschnitten wurden

Ein anderer Punkt, der in Abbildung 6.16 betrachtet werden sollte, sind die Vergleichswerte der Oberflächenrauheit, gemessen für ein gängiges Werkzeug, wie das Hobelmesser. Dessen Werte betragen im Versuch bis zu $200\mu\text{m}$, jedoch können sie noch größer sein, wie von Portela u. Cantwell [2001] gezeigt.

Diese Art, die Qualität des Schnittes anhand der Oberflächenrauheit zu bewerten, findet in der Fertigungstechnik Anwendung.

6.4.2 Farbe

Zur Untersuchung des Einflusses des Schneideverfahrens wurde die Farbveränderung geschnittener Apfelscheiben im CIE-Lab Farbraum beobachtet. Die Ergebnisse der Farbanalyse sind in Grafik 6.17 dargestellt. Der Farbveränderungsverlauf jeder Achse, CIE-L, CIE-a und CIE-b ist über eine Zeitspanne von 50min für jede der drei Schneidmethoden dargestellt. Jede Grafik enthält außerdem einen Wert $|\Delta|$, der den Wert der Farbveränderung jeder Achse repräsentiert. Bemerkenswert ist vor allem die Veränderung des CIE-L Wertes, der für den Wasserstrahlschnitt mit einem Wert von $|\Delta| = 1.4224$ am niedrigsten ist während die Werte für das Küchenmesser von $|\Delta| = 5.5723$ und das Hobelmesser mit $|\Delta| = 12.1293$ deutlich höher liegen.

Die zweite Linie der Grafik stellt die Geschwindigkeit der Farbveränderung dar, die durch Berechnung des Gradienten der Farbveränderung ermittelt wurde. Es fällt dabei auf, dass die Farbveränderung für den Betrag des CIE-L-Wertes des Wasserstrahls in den ersten Minuten klein ist genauso wie die Veränderungen der CIE-a und CIE-b-Werte. Dagegen findet man einen hohen Wert für die Veränderung des CIE-L-Betrages für die mit Hobelmesser geschnittenen Proben während der ersten 20min und danach eine konstante Rate bis zu 40min . Für die Proben, die mit dem Küchenmesser geschnitten wurden, lässt sich ebenfalls eine schwache Änderung des CIE-L-Betrages während der ersten 18min beobachten, die sich dann bis zu 40min auf einem konstanten Wert hält.

6.4.3 Trocknung

Unter bestimmten Schnittbedingungen wurden Trocknungsversuche an Äpfeln durchgeführt. Drei Schnitttechniken (rotierende Schneide, Messer und Wasserstrahl [$130\mu\text{m}$, 2000bar , $5\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ Vorschubgeschwindigkeit, $0.5\frac{\text{l}}{\text{min}}$ Wassermenge]) wurden hier verarbeitet, um die Oberflächenrauheit und die Farbveränderung zu beobachten. Mit jeder dieser Techniken wurden fünf Scheiben aus der obere Hälfte des Apfels mit ca. $4\text{mm}(\pm 0.5\text{mm})$ hergestellt. Die Apfelscheiben wurden mittels Konvektionstrocknung getrocknet. Grundlegend ist festzustellen, dass die Schnitttechnik einen starken Einfluss auf die spätere getrocknete Apfelscheibe besitzt.

Die Äpfel, welche mittels Wasserstrahl geschnitten wurden, weisen über alle Trocknungsbedingungen hinweg die geringste Farbveränderung bzw. Bräunung auf. Sowohl die mit dem Messer geschnittenen Scheiben als auch die Scheiben, welche mit der rotierenden Schneide geschnitten wurden, bräunen in ähnlicher Größenordnung während der Trocknung. Bei den Versuchen mit 75°C ist die geringste Farbveränderung, auch TCD (Total Color Difference), mit etwa 2.16 (Wasserstrahl), bis 8.13 (Messer)

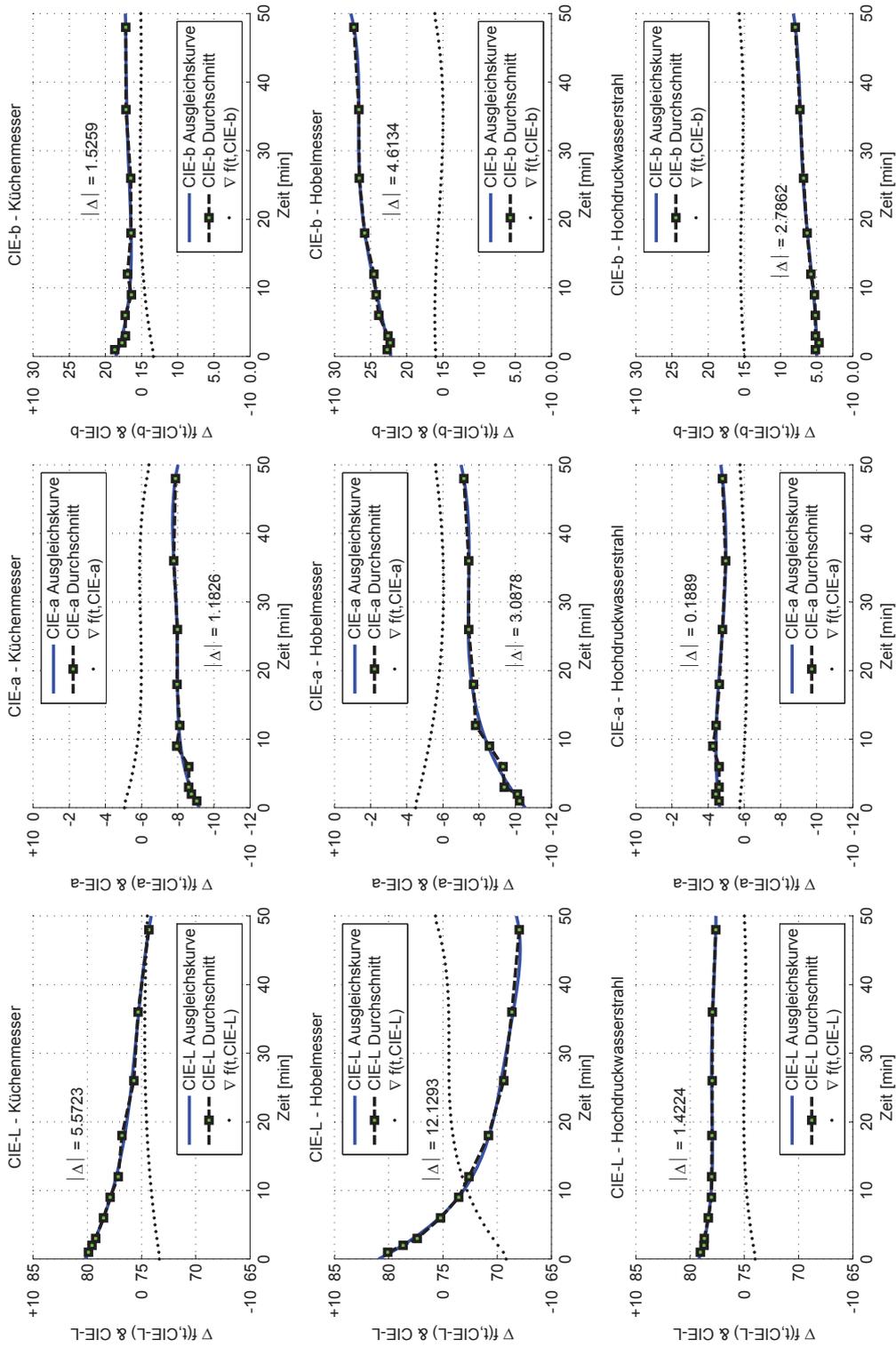
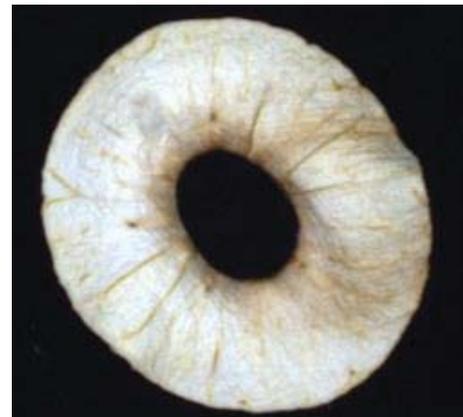
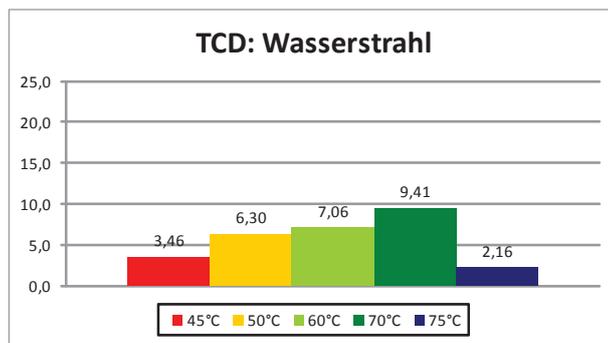
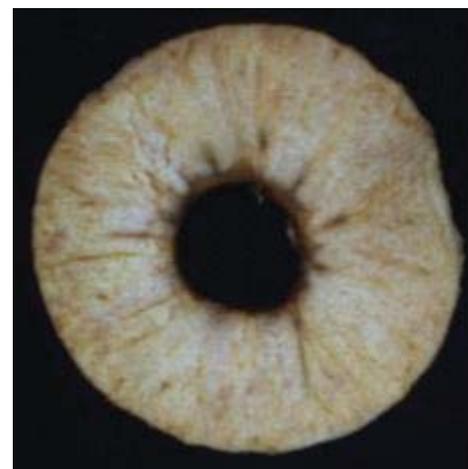
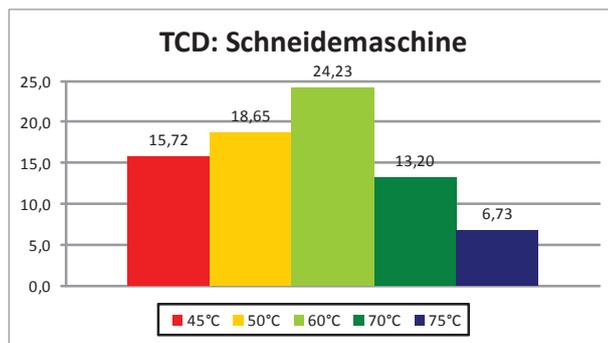


Abbildung 6.17: CIE-Lab-Farbanalyse der drei in Abbildung 6.16 dargestellten Schnittverfahren Die linke Spalte stellt die CIE-L-Werte dar, sowie die mittlere Spalte den CIE-a-Werte und die rechte Spalte den CIE-b-Werte. Die oberste Reihe steht für das Schnittverfahren „Küchenmesser“, die mittlere für „Hobelmesser“ und die unterste für den „Wasserstrahl“

feststellbar, wohingegen Apfelscheiben, die längere Zeit bei niedrigeren Temperaturen getrocknet werden, eine stärkere Farbveränderung aufweisen. Eine lineare Abhängigkeit zwischen Temperatur und Bräunung kann jedoch nicht festgestellt werden, lediglich beim Wasserstrahlschneiden ist eine Tendenz in Richtung Zunahme des TCD mit steigender Temperatur erkennbar (siehe Abbildung 6.18).



geringe Farbveränderung
(Scheibe 3, Wasserstrahl, 75°C)



Stark gebräunte Apfelscheibe
(Scheibe 3, Messer, 60°C)

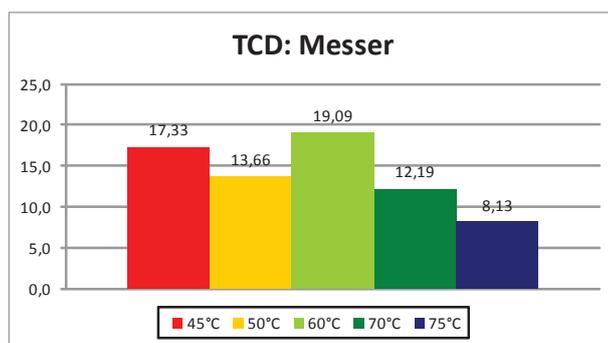


Abbildung 6.18: Farbveränderung durch Trocknung von Apfelscheiben, welche mit drei unterschiedlichen Werkzeugen geschnitten wurden

Die Oberflächenrauheit wird hauptsächlich durch den Schnitt beeinflusst. Zwar wird die Rauheit durch die Trocknung allgemein gesenkt, jedoch ist es stark von der Schnittart abhängig, welche Oberflächengüte erzeugt wird. Nach der Trocknung besitzen die mit Wasserstrahl geschnittenen Äpfel die kleinste Oberflächenrauheit (z.B bei 70°C, 52.0µm), gefolgt vom Messer (73.2µm) und rotierender Schneide (87.7µm). Da die Streuung der

Rauheit von Apfel zu Apfel jedoch mit $\pm 5.5\mu m$ recht groß ist, kann für viele Prozesseinstellungen keine Signifikanz der Effekte Trocknungstemperatur und Schnittart auf den Rauheitswert festgestellt werden.

Die geringste Farbveränderung und Oberflächenrauheit wird von Wasserstrahl geschnittenen Äpfeln mit $75^{\circ}C$ Trocknung erreicht, die höchste Farbveränderung und Rauheit beim Schnitt mittels rotierender Schneide und Trocknung mit $60^{\circ}C$.

6.5 Fazit

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von zwei Produkten, Äpfeln der Sorte Jonagold und Honig-Melonen gewonnen. Die Qualität der Schnitte und die Kapazität der Anlage wurde ermittelt. Das Schneiden von Melonen diente der Bestimmung des minimal notwendigen Druckes und der minimal notwendigen Wassermenge für den Schälprozess.

Die Abbildung 6.19 zeigt die hydraulische Leistung des Wasserstrahls als Funktion der benötigten Wassermenge. Es werden die Kurven für die vier Düsendurchmesser (80, 100, 130 und $150\mu\text{m}$) mit den gemäß des vorherigen Kapitels besten Resultaten dargestellt. Außer den erwähnten Kurven der hydraulischen Leistung, bezogen auf die Düsendurchmesser, sind zwei Kurven eingezeichnet, die die Ergebnisse für den Schälprozess der Melonen und den Schneideprozess der Apfelscheiben zusammenfassen. Es wird deutlich, dass die Energie des Wasserstrahls für den Schnitt entscheidend ist. Die Kurven, welche die Bereiche begrenzen, zeigen, wo der Strahl die zur Durchführung der Aufgaben nötige Energie besitzt. Jedoch wird auch ein Bereich guter Schnittqualität (Bereich über der Linie) und ein Bereich zweifelhafter Qualität (unterer Teil der Grafik) sichtbar.

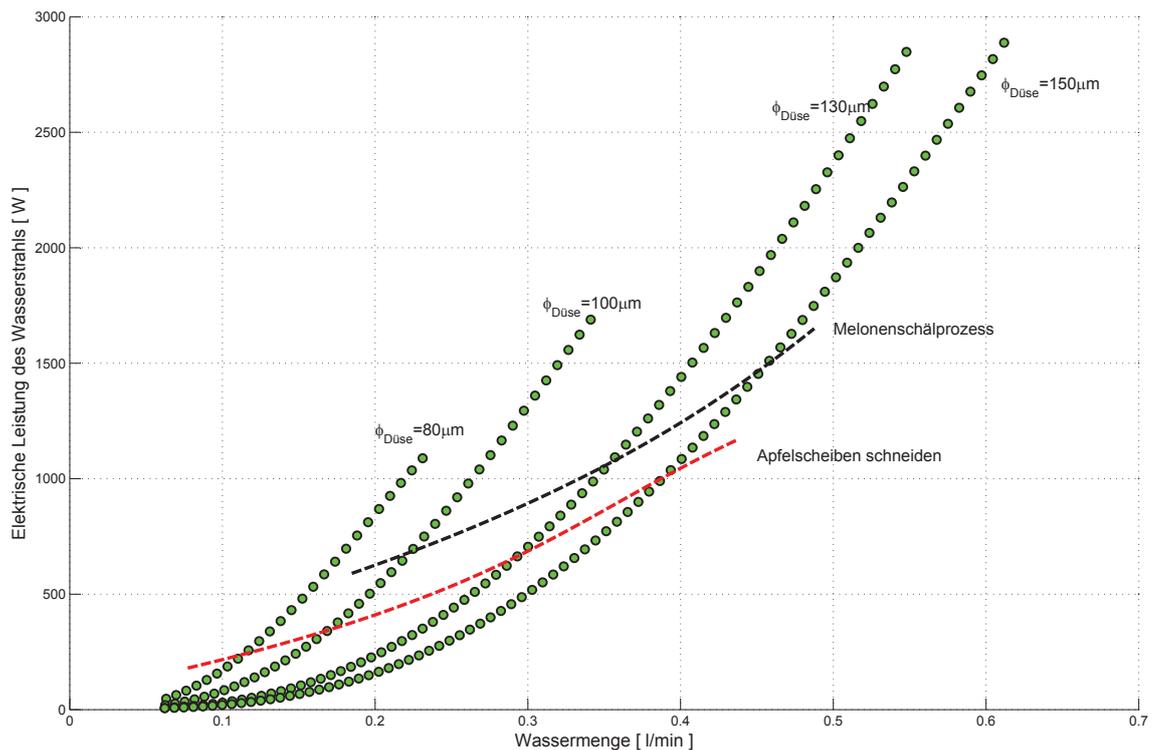


Abbildung 6.19: Hydraulische Leistung des Wasserstrahls bei Düsendurchmesser von 80, 100, 130 und $150\mu\text{m}$, mit entsprechenden Qualitätsübergangsbereichen bei Melonenschälprozess und Apfelscheibenschneiden.

In diesem Projekt wurde ein Druckübersetzer in Verbindung mit ölhydraulischen Antrieben als Druckerzeugungssystem eingesetzt. Dank der Antriebsteuerung der Hochdruckpumpe konnte der Druck geregelt werden und dadurch ein variierbarer Was-

serverbrauch bis $0.6 \frac{l}{min}$ eingestellt werden. Der Energieverbrauch wurde durch den Druck als Funktion der Frequenz am Getriebemotor beobachtet. Bei dieser Konfiguration wurde es möglich, Düsen von 80, 100, 130 μm mit einstellbarem Druck von 100 bis 3000 *bar* zu testen. Der Energieverbrauch liegt hierbei zwischen 0.7 *kW* und 1.5 *kW*, um Melonen zu schälen und zwischen 0.3 *kW* und 1.1 *kW*, um Apfelscheiben zu schneiden, sodass die Druckwerte von bis zu 3000 *bar* erreicht werden können.

Man kann aus diesen Ergebnissen schließen, dass für einen optimalen Schneideprozess für Apfelscheiben eine Wassermenge von $0.3 \frac{l}{min}$ bei Einsatz von Düsen mit einem Durchmesser von 80, 100, 130 oder 150 μm nötig ist, wofür eine elektrische Leistung für den Antrieb von ca. 3 *KW* aufgebracht werden muss.

Außerdem ergibt sich, dass im Melonenschälprozess ein System zum Einsatz kommen muss, das mit Düsendurchmessern von 100 bis 150 μm und Wassermengen von 0.3 bis $0.5 \frac{l}{min}$ betrieben wird, wofür ein elektrischer Antrieb mit 4 *kW* benötigt wird.

Ein Vergleich des Wasserstrahlschneidens mit klassischem Schneideverfahren zeigt hinsichtlich Rauigkeit und Farbe deutliche Vorteile des Wasserstrahlschneidens. Mit diesem Schneideverfahren sind wesentlich glattere Schnitte zu erreichen, was für die Haltbarkeit aber auch für die organoleptische Wahrnehmung wichtig ist.

Die höhere Farbkonstanz der mit Wasserstrahl geschnittenen Produkte ist daher ein großer Vorteil.

Ein weiterer Vorteil beim Einsatz der Wasserstrahltechnologie ist die Gewährleistung einer besseren Produktqualität.

Bräunung gilt als Indikator für die Qualität des Produktes und ist stark von der Schneidemethode abhängig (siehe Abschnitt 2.3). Portela u. Cantwell [2001] zeigten in ihrer Studie, dass die Schärfe der Klingen einen Einfluss auf die Produktqualität (wie zum Beispiel chemische und biochemische Reaktionen an der Produktoberfläche) haben. Sie berichten, dass scharfe Klingen insgesamt bessere Ergebnisse gezeigt haben, ohne das Aroma und den Zuckergehalt des Produktes zu beeinträchtigen. Toivonen u. Brummell [2008] fanden in ihren Untersuchungen heraus, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Zustand eines geschnittenen Gewebes und deren enzymatischer Bräunung gibt.

Die bis jetzt erhaltenen Untersuchungsergebnisse von Oberflächenrauheit und -Farbe, wobei drei unterschiedliche Schneidemethoden eingesetzt wurden (siehe Abb. 6.16 und 6.17), geben Hinweise auf das Potential der Hochdruckwasserstrahlschneidetechnik zur Besserung der Produktqualität. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Wasserstrahlparameter neben dem direkten Einfluss auf die Oberflächenrauheit auch einen Einfluss auf die ausschließende enzymatische Bräunung hat.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren vorgestellt und untersucht, mit welchem Früchte annähernd verlustfrei und unter sehr hygienischen Bedingungen geschnitten werden können. Die Produkte – hier gezeigt am Beispiel von Äpfeln und Melonen – werden mit einem Hochdruckwasserstrahl geschnitten, der durch ein bildverarbeitendes System entsprechend der Anatomie der Frucht geführt werden kann. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die individuelle Schnitfführung, die Materialverluste minimiert und die Tatsache, dass die Frucht ohne wesentlichen Eingriff von Personal bearbeitet wird.

Die Literaturlauswertung ergab, dass diese Technologie bislang noch nicht bearbeitet wurde. Der Einsatz des Hochdruckwasserstrahlschneidens im Bereich der Agrartechnik beschränkte sich auf das Schneiden von Zuckerrüben Brüser [2008], Ligoeki [2005] bzw. Kartoffeln Becker u. Gray [1992], das Zerteilen von Fleisch Bansal u. Walker [1999] und Fisch Lobash u. a. [1990] sowie die Nutzung von Wasserstrahlen im Zusammenhang mit der Injektion von Flüssigdünger in Ackerböden Niemoeller u. a. [2011].

Ziel dieser Arbeit war es daher, die Einsatzmöglichkeiten des Wasserstrahlschneidens zu erfassen und zu bewerten. Dazu wurden in einer Vielzahl von Einzelversuchen die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern wie Wasserdruck, Düsendurchmesser, Vorschubgeschwindigkeit und Düsenabstand auf das Schnittergebnis, also die Rauheit der entstehenden Schnittfläche untersucht. Ein Vergleich mit konventionellen Schneidemetoden erfolgte hinsichtlich der Schnittergebnisse und der Auswirkungen des Wasserstrahlschneidens auf nachfolgende Verfahrensschritte, wie dem Trocknen.

Es wurde ein komplexer, hoch automatisierter Prüfstand aufgebaut, mit welchem die oben genannten Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Der Versuchsstand umfasste das Schneideverfahren, die Bilderkennung und Bildauswertung sowie die Steuerung des Schnittes. Dazu wurde eine Hochdruckwasserpumpe verwendet, welche mit einem ölhydraulischem Antrieb auf der Primärseite, einen Druckübersetzer versorgt hat. Dies ergab auf der Sekundärseite den zum Schneiden verwendeten Wasserdruck von maximal 4000bar. Ein solcher Aufbau findet auch in der Metall-Fertigungstechnik Anwendung.

Die verwendete Hochdruckwasserpumpe fördert bei diesem Druck kleine Wassermengen von bis zu $0.6 \frac{l}{min}$. Die für das Projekt verwendete Hochdruckwasserpumpe unterscheidet sich von den in anderen Studien verwendeten Pumpen, da diese generell mit niedrigem Druck von maximal 500bar und einer Wassermenge von mindestens $3 \frac{l}{min}$ betrieben worden sind.

Mit Hilfe des ölhydraulischen Antriebs konnte ein breiter Druckbereich untersucht werden, damit ein Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch und Druck je Arbeitspunkt ermittelt werden konnte. Desweiteren konnten Parameter untersucht werden, welche im

Bereich der Wasserstrahlschneidetechnologie in Agrarwissenschaften bisher noch nicht nachgegangen worden ist. Der Wasserverbrauch konnte unter $0.6 \frac{l}{min}$ gehalten werden, wobei der Druck zwischen 100 und 3000bar variiert wurde. Somit konnten in diesem Bereich die minimalen Schnittparameter ermittelt werden, welche zum Schneiden von Agrarprodukten nötig sind. Die Vorschubgeschwindigkeit des Schneidekopfes wird über die Robotersteuerung eingestellt. Das Kalibrierungszertifikat des Drucksensors garantiert die Genauigkeit der vom Computer erfassten Messwerte.

Für die Realisierung des Systems wurde eine Plattform verwendet, in der die Kommunikation nach Industriestandard, die Bildanalyse-Algorithmen und die Ansteuerung des Roboters integriert sind. Grundlage hierfür war ein sehr leistungsstarker Rechner, weshalb hierbei von einer intelligenten Steuerung auf PC-Basis gesprochen wird.

Die Versuche zeigten, dass ein Wasserdruck von 1300bar in der Regel ausreicht, um Fruchtfleisch zu schneiden. Dabei wird eine qualitativ hochwertige Oberfläche erzeugt. Zum Schälen ist wegen der stabileren Schale ein höherer Druck, bis 2000bar notwendig. Die Erkennung der Anatomie der Frucht und die entsprechende Steuerung des Schrittes ist problemlos möglich. Im Vergleich mit konventionellen Schnittverfahren ergaben sich große Vorteile, was die Schnittoberflächen und die Farbkonstanz des geschnittenen Produktes anbelangt.

Bei Melonen sollte ein Schälprozess realisiert werden. Die Konturen der Melonen wurde mit Hilfe der Bildverarbeitungstechnik erfasst. Der Schälprozess wurde mit einem Roboter durchgeführt, welcher mit Hochdruckwasserstrahlen schneidet.

Äpfel wurden geschnitten, um diese auf Basis der Rauheit hinsichtlich der Schnittqualität zu bewerten. Dabei wurden die geometrischen, hydraulischen und dynamischen Parameter kontrolliert, um die Minima der Parameter zu ermitteln.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind aufgrund des Druckniveaus und der Ziele nicht mit anderen Arbeiten vergleichbar. Andere Autoren haben den Fokus ihrer Arbeit auf die Optimierung der Prozessleistung gelegt und nach den hierfür benötigten optimalen Parametern gesucht. In dieser Arbeit konnte jedoch ebenfalls eine deutliche Verringerung der Parameter, hinsichtlich der Leistung und des Wasserverbrauchs, ermittelt werden.

Für die Anwendung können bereits Antriebe unter 2kW ausreichend sein. Aufgrund dieser Tatsache kann auf eine mittelgroße Wasserpumpe zurückgegriffen werden, wie sie zu Reinigungszwecken verwendet wird. Mit einer Leistung von 2kW können Drücke von bis zu 2500bar mit einer Düse von $100\mu m$, sowie 1500bar mit einer Düse von $130\mu m$ erzeugt werden. Mit diesen Parametern kann eine gute Schnittqualität sichergestellt werden.

Weiterhin wurde der Unterschied untersucht, der sich ergibt, wenn mittels Hochdruckwasserstrahl oder mit einer traditionellen Methode geschnitten wird. Diese Ergebnisse sollen beitragen, das neue Schälverfahren zu bewerten. Als Indikatoren der Schnittqualität wurden Rauheit und Farbe verwendet.

Es wurden mit drei verschiedenen Verfahren Schnittproben von Äpfeln angefertigt.

Diese Proben wurden bezüglich der Rauheit und der Farbe im CIELab-Raum an der Schnittoberfläche miteinander verglichen. Die Schnittproben, welche mit dem Hochdruckwasserstrahl geschnitten wurden, zeigten die geringste Oberflächenrauheit. Auffallend ist hierbei die geringe Streuung der Daten im Vergleich zu den anderen Schnittmethoden. An freier Luft zeigte der Farbwertgradient nach einer Zeit von 50 Minuten lediglich geringe Veränderungen auf. Die mittels Hochdruckwasserstrahlschneidens angefertigten Proben zeigten eine noch geringere Verfärbung auf. Im Zuge der zweiten Vergleichsmethode wurde die Farbe am Ende eines Trocknungsprozesses betrachtet. Die Trocknungstemperaturen beliefen sich hierbei zwischen 45, über 50, 60 und 70 bis hin zu 75°C. Auch bei diesem Vergleich zeigten die mit Wasserstrahltechnologie geschnittenen Proben eine geringere Verfärbung.

Bei einer Trocknungstemperatur von 45°C kann eine lediglich geringe Farbveränderung festgestellt werden. Dies ist zum einen energetisch gesehen von Interesse, da sich durch einen Prozess mit tieferen Temperaturen ein energiesparsamer Prozess entwickelt. Außerdem zeigt sich durch die geringe Farbveränderung eine Steigerung der Produktqualität von Konvektionstrocknungsverfahren. Zudem konnte eine Zunahme der Farbveränderung (TCD) mit steigenden Trocknungstemperaturen festgestellt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stellen dar, welche Qualität bezüglich Farbe und Oberfläche bei bestimmten Behandlungen von Apfelscheiben bzw. Melonenschale erreicht werden kann.

Die Vorteile des Wasserstrahlverfahrens sind gegenüber den anderen Verfahren die hohe Qualität und auch die Hygiene. Auch aus Kostensicht ist das Verfahren im vorgeschlagenen Arbeitsbereich realisierbar, da zur Druckerzeugung mittlerer Leistungen Reinigungswasserpumpen verwendet werden können.

Die weitere Entwicklung des Projektes sollte in zwei Richtungen erfolgen: Zum einen ist es aus ökonomischer Sicht wünschenswert, den Druck, der für einen qualitativ hochwertigen Schnitt erforderlich ist, so niedrig wie möglich zu halten. Wenn es gelingt, den Druck auf ein Niveau unter 1000bar zu senken, eröffnen sich wesentlich preisgünstigere Möglichkeiten, den Wasserstrahl zu erzeugen. Damit wäre ein wesentliches Hemmnis der Nutzung dieser Technologie ausgeräumt. Weitere Untersuchungen der Schneideleistung unterschiedlicher Düsen sollten zu diesem Zweck auch mit anderen Früchten, wie beispielsweise Mangos durchgeführt werden. Auch ist die Untersuchung des Verhaltens von inhomogenen Gütern, zum Beispiel von Früchten mit Kern oder Stein wünschenswert. Zum andern ist das Verfahren in eine Produktionskette zu integrieren. Dazu ist es notwendig, Handhabungssysteme zu entwickeln, mit denen die Früchte in die Schneideanlage eingelegt und entnommen werden können. Dabei darf der Vorteil der Hygiene des Verfahrens nicht verloren gehen. Der Verfahrensablauf muss dafür automatisiert und optimiert werden.

Es wird vorgeschlagen eine größere und effizientere Anlage im Technikumsmaßstab aufzubauen. Mögliche Komponenten in einem solchen System wären beispielsweise eine 3D-Kamera oder ein Laserinterferrometer, um die Oberfläche komplexer Strukturen zu erfassen. Auf einer linearen Führung angebracht, könnte diese Abstandsmessung bei einfachen, regelmäßigen Fruchtformen einen Ersatz der Bildverarbeitung darstellen und

das System entsprechend vereinfachen.

Mit der so gewonnenen Kontur können wieder die Anlagenkomponenten, wie z.B. der Schneidekopf, gesteuert werden. Solch eine Kombination der Komponenten sollte anhand der Kosten, der Verringerung der Komplexität und der Handhabung analysiert werden.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Qualität von Agrarprodukten durch den Einsatz innovativer Technologien wesentlich verbessert werden kann. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass nicht nur die Produktion selbst, sondern auch die Nachbehandlung nach der Ernte einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der Produkte hat. Dazu gehört auch die wesentliche Verbesserung der Hygiene und der Handhabung der Produkte. Weiterhin sind betriebswirtschaftliche Überlegungen treibender Faktor für einen immer höher werdenden Automatisierungsgrad der Produktion.

A Untersuchungen zur Bestimmung der Schnittleistung des Systems unter Berücksichtigung der Oberflächenrauheit des geschnittenen Produkts

Tabelle A.1: Zuordnung der Bilder zu den Prozessparametern

| Düsendurchmesser [μm] | Abbildung in Anhang A |
|------------------------------|-----------------------|
| 80 | A.1 bis A.6 |
| 100 | A.8 bis A.11 |
| 130 | A.13 bis A.16 |
| 150 | A.18 bis A.21 |
| 180 | A.23 bis A.25 |

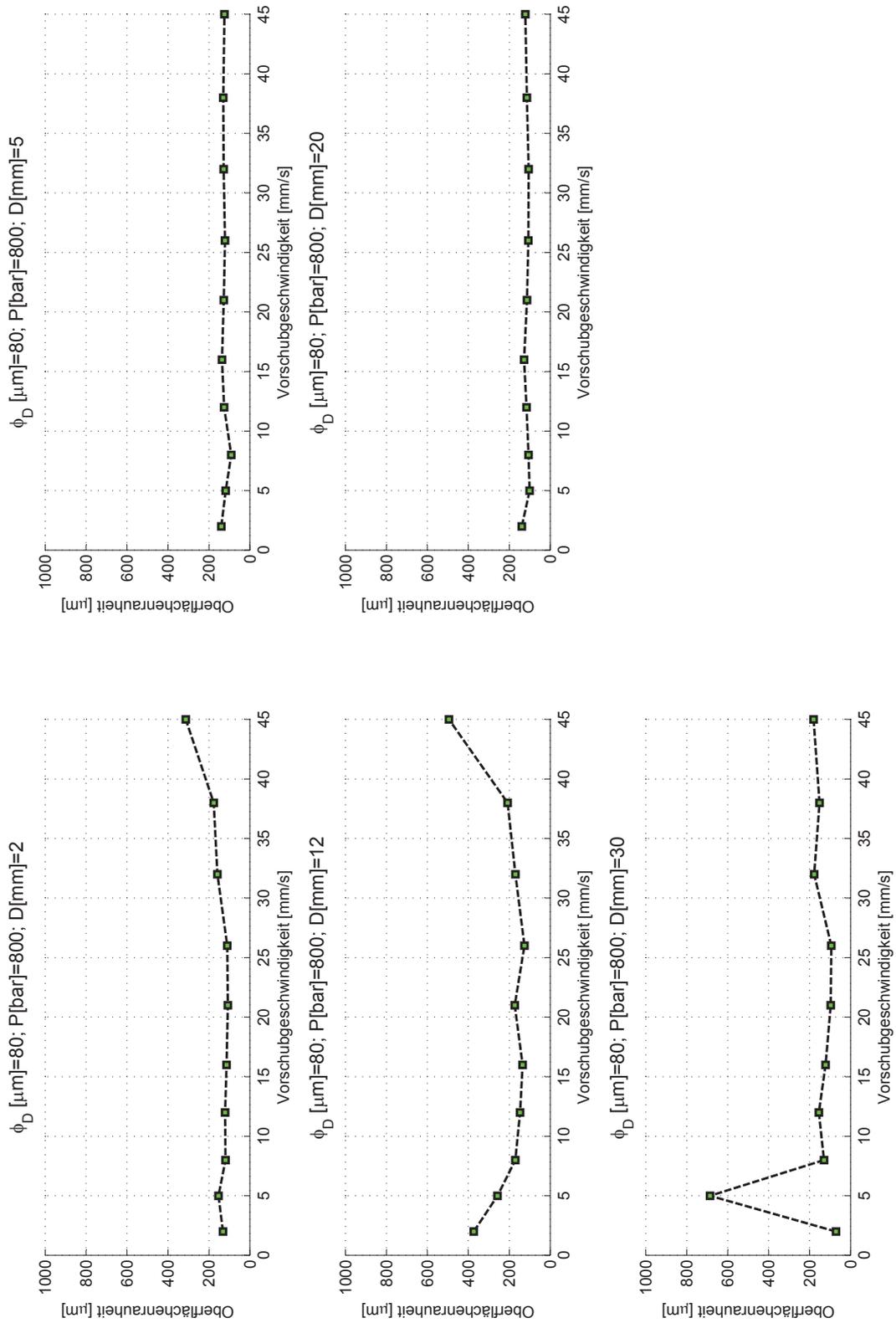


Abbildung A.1: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 80$ und einem Druck von $p [bar] = 800$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20 \ 30]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v [\frac{mm}{s}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

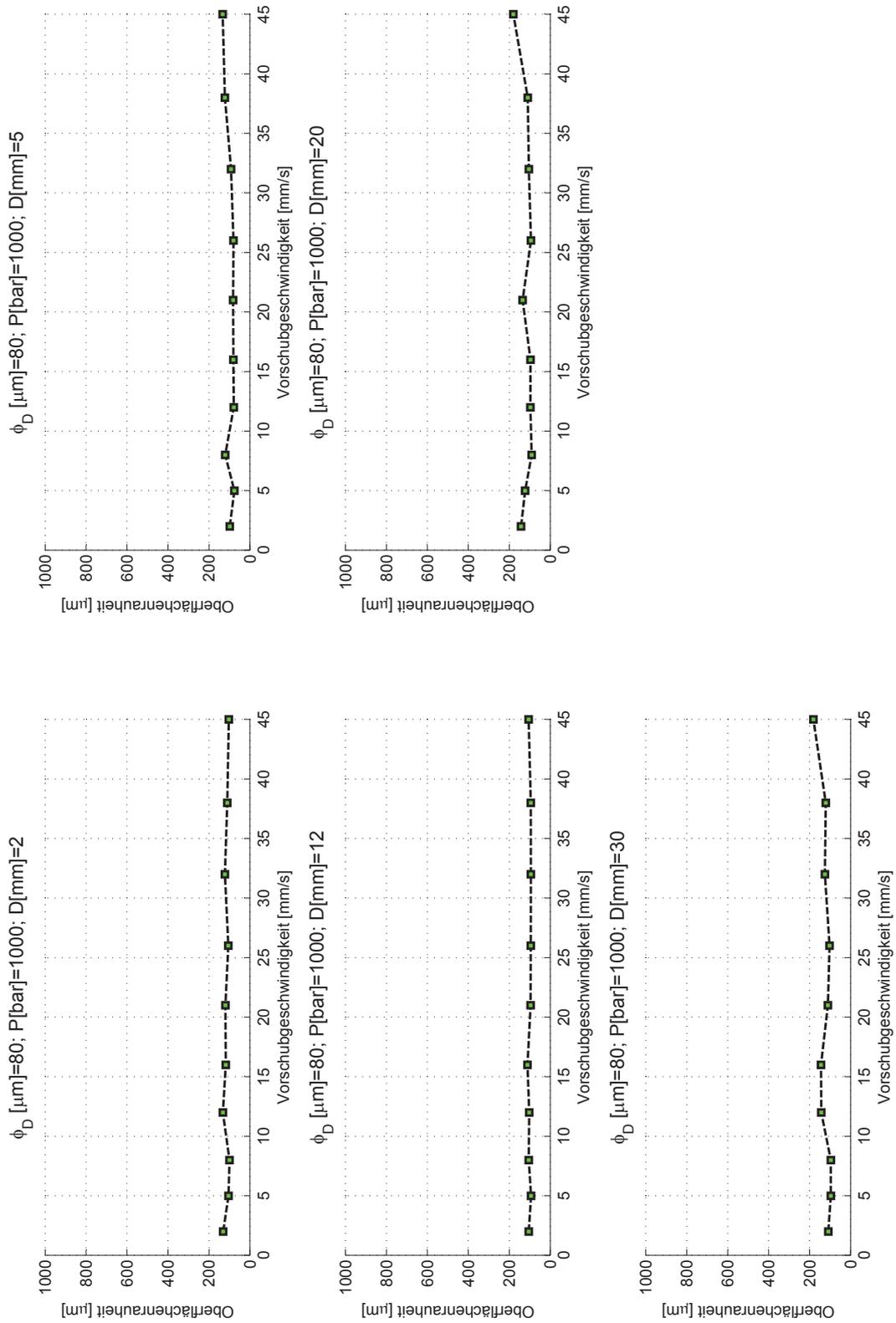


Abbildung A.2: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D = 80$ µm und einem Druck von $p = 1000$ mit Schneideabstandsvektor $D = [2 \ 5 \ 12 \ 20 \ 30]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

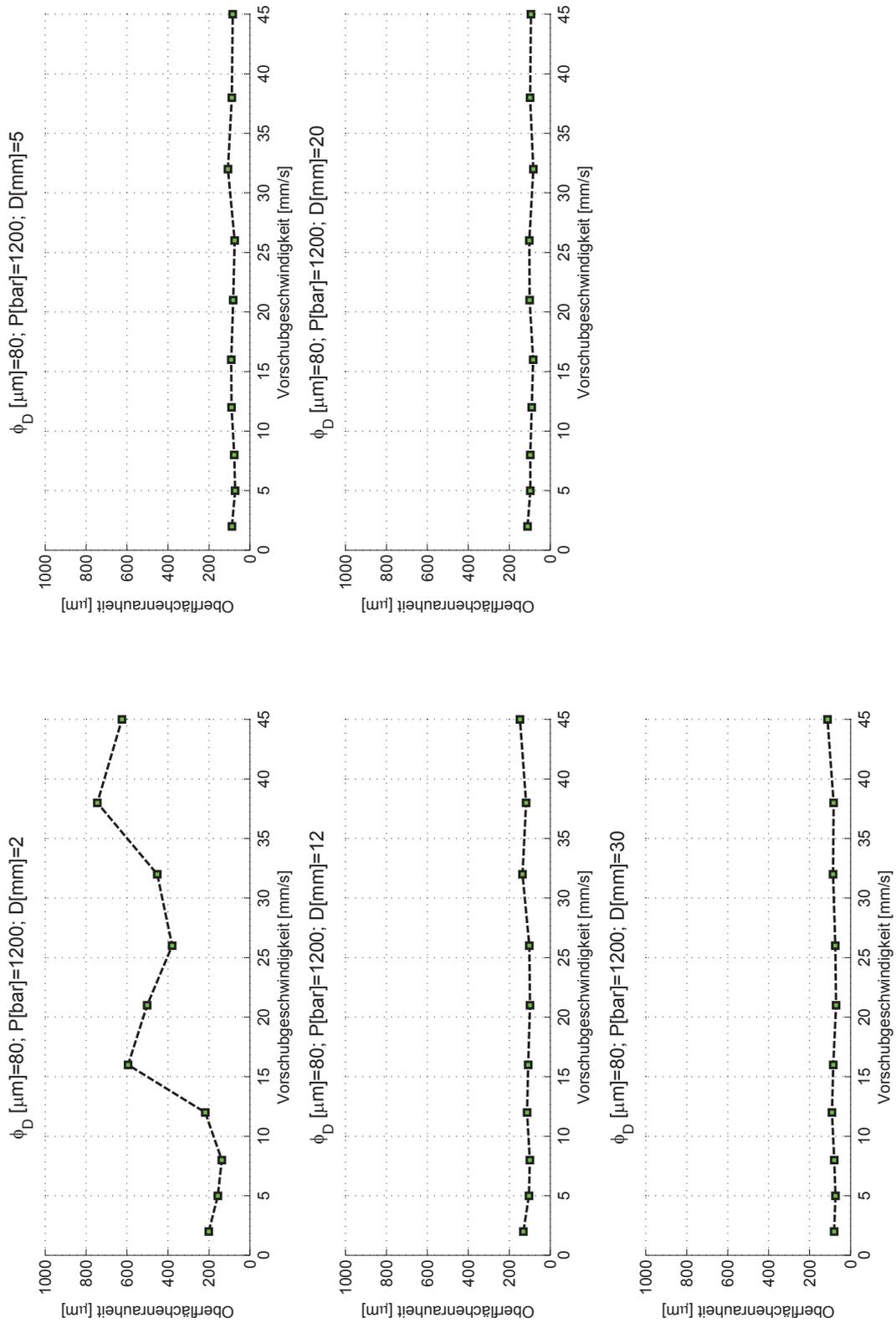


Abbildung A.3: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1200$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [2\ 5\ 8\ 12\ 16\ 21\ 26\ 32\ 38\ 45]$

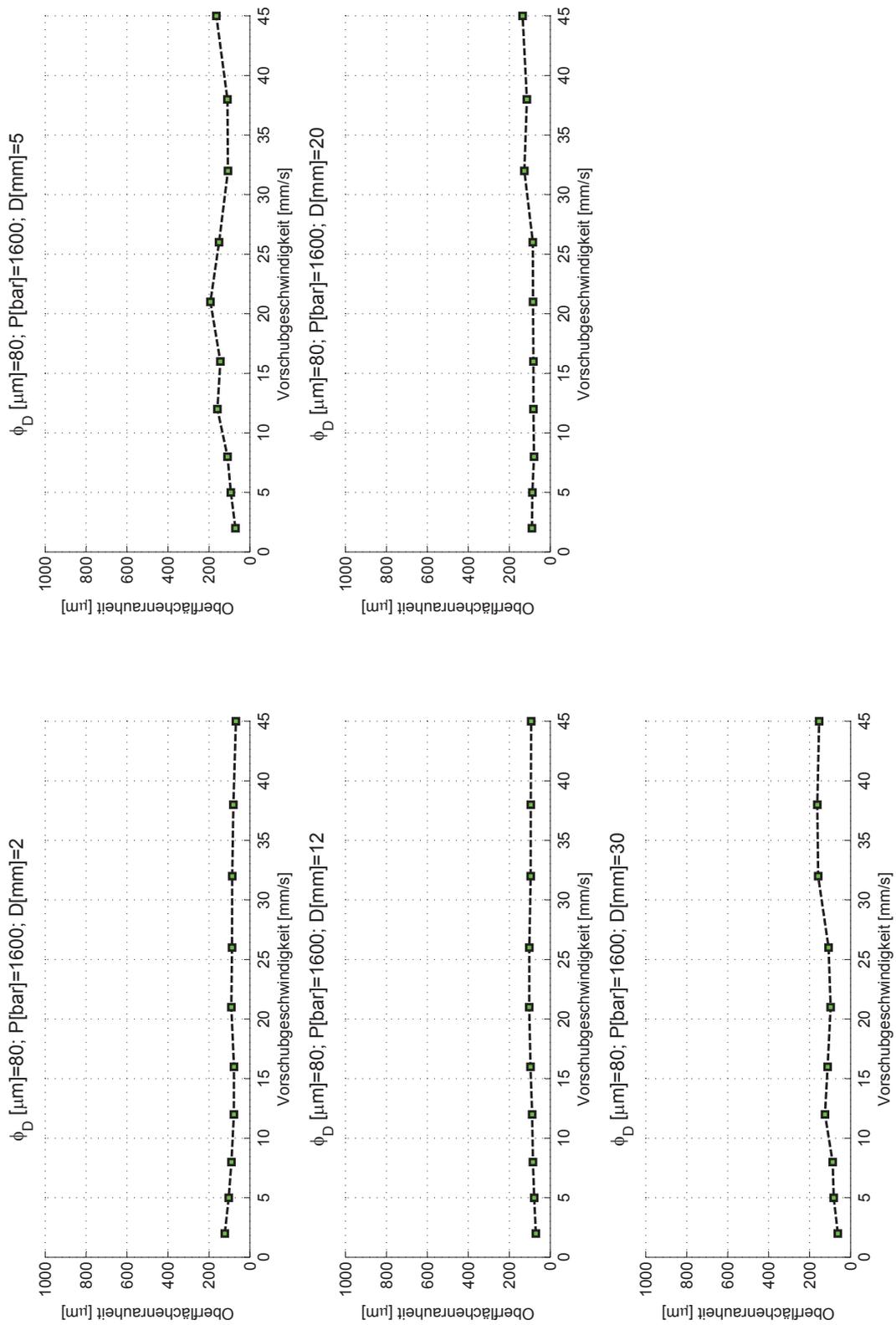


Abbildung A.4: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 80$ und einem Druck von $p [bar] = 1600$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20 \ 30]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v [\frac{mm}{s}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

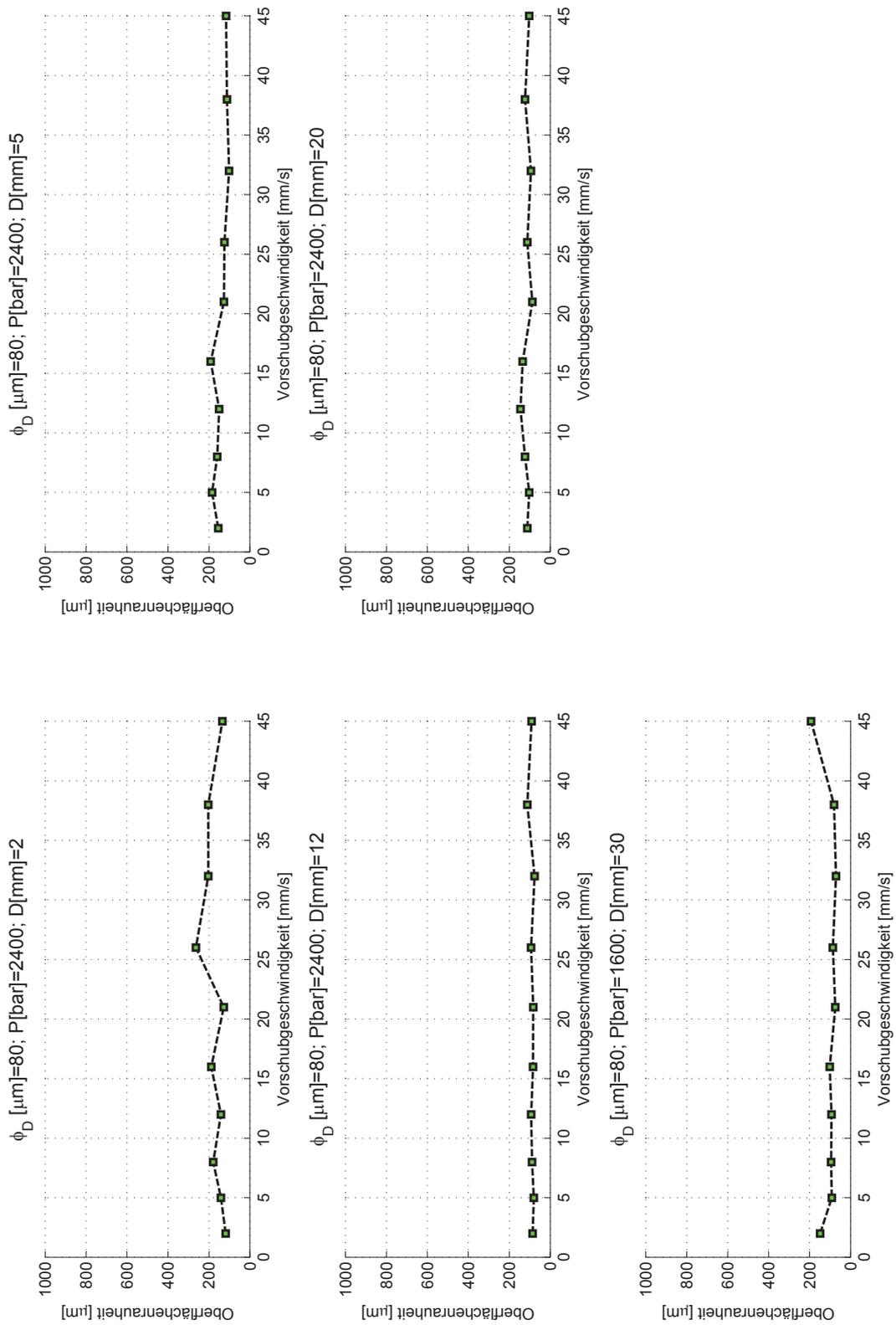


Abbildung A.5: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 2400$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 20 \ 30]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

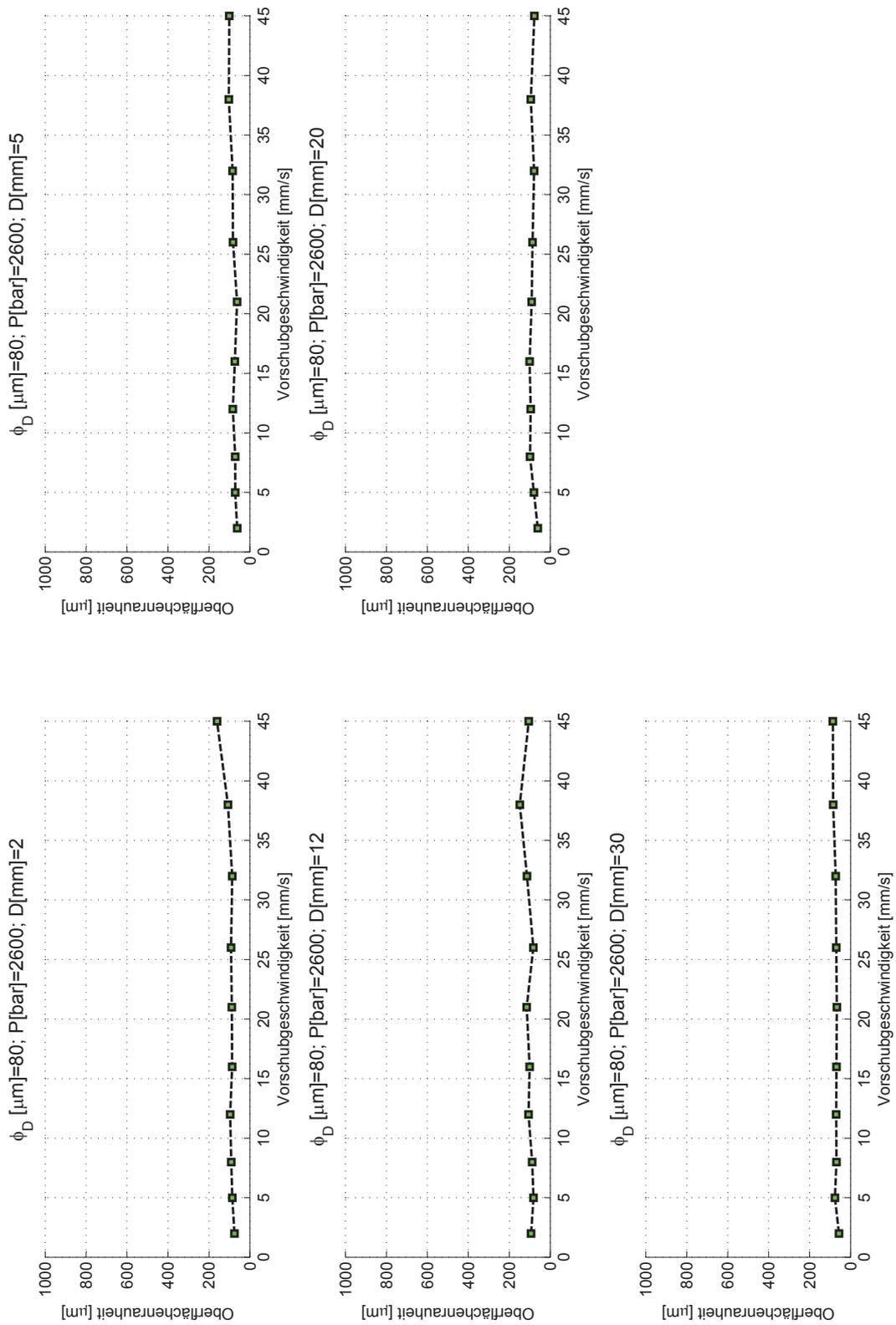


Abbildung A.6: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D = 80$ und einem Druck von $p = 2600$ mit Schneideabstandsvektor $D = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

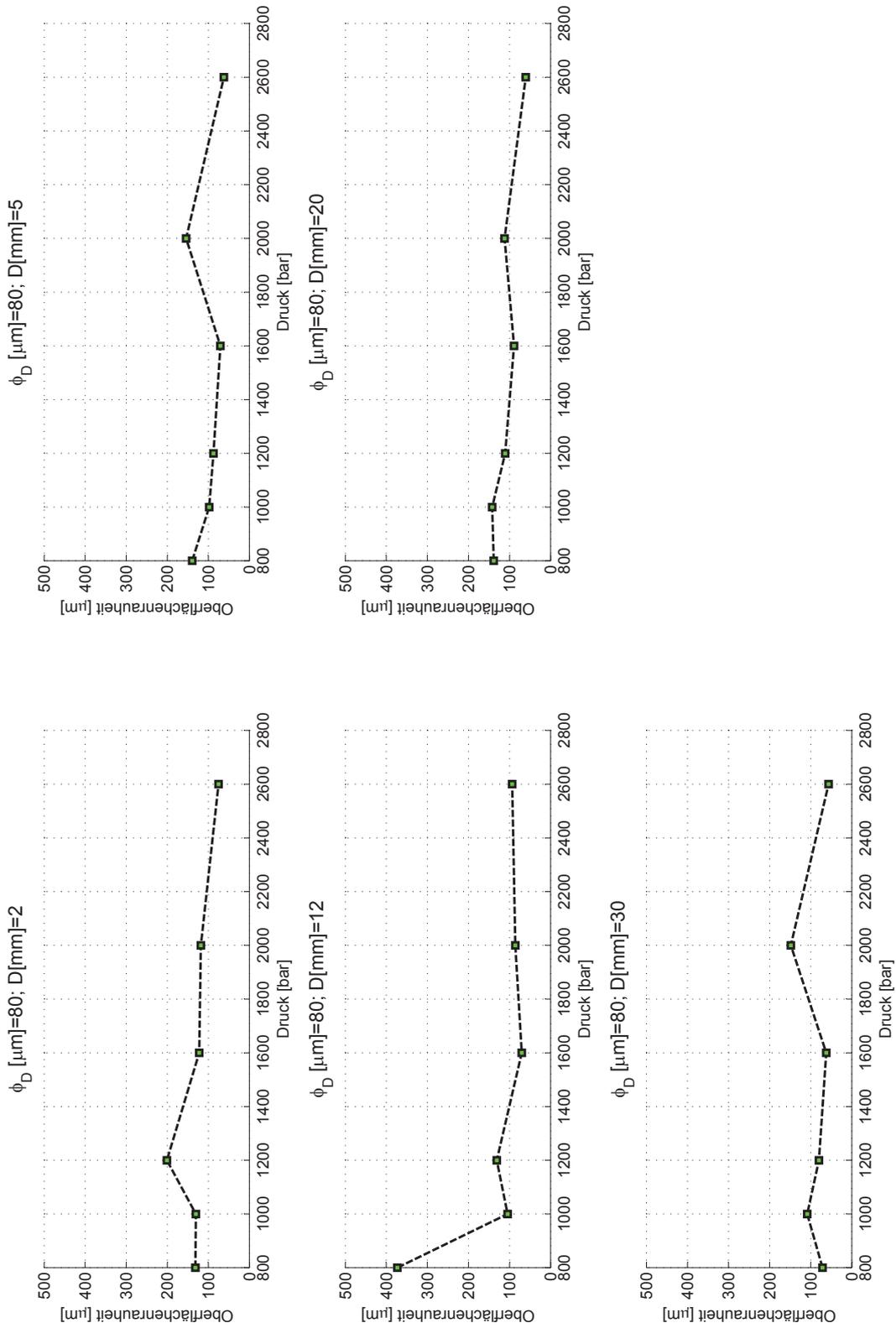


Abbildung A.7: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 80$ und einem Druckbereich von $p [bar] = [800 \ 1100 \ 1200 \ 1600 \ 200 \ 2400 \ 2600]$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20 \ 30]$ und einer konstanten Geschwindigkeit von $v [\frac{mm}{s}] = 2$

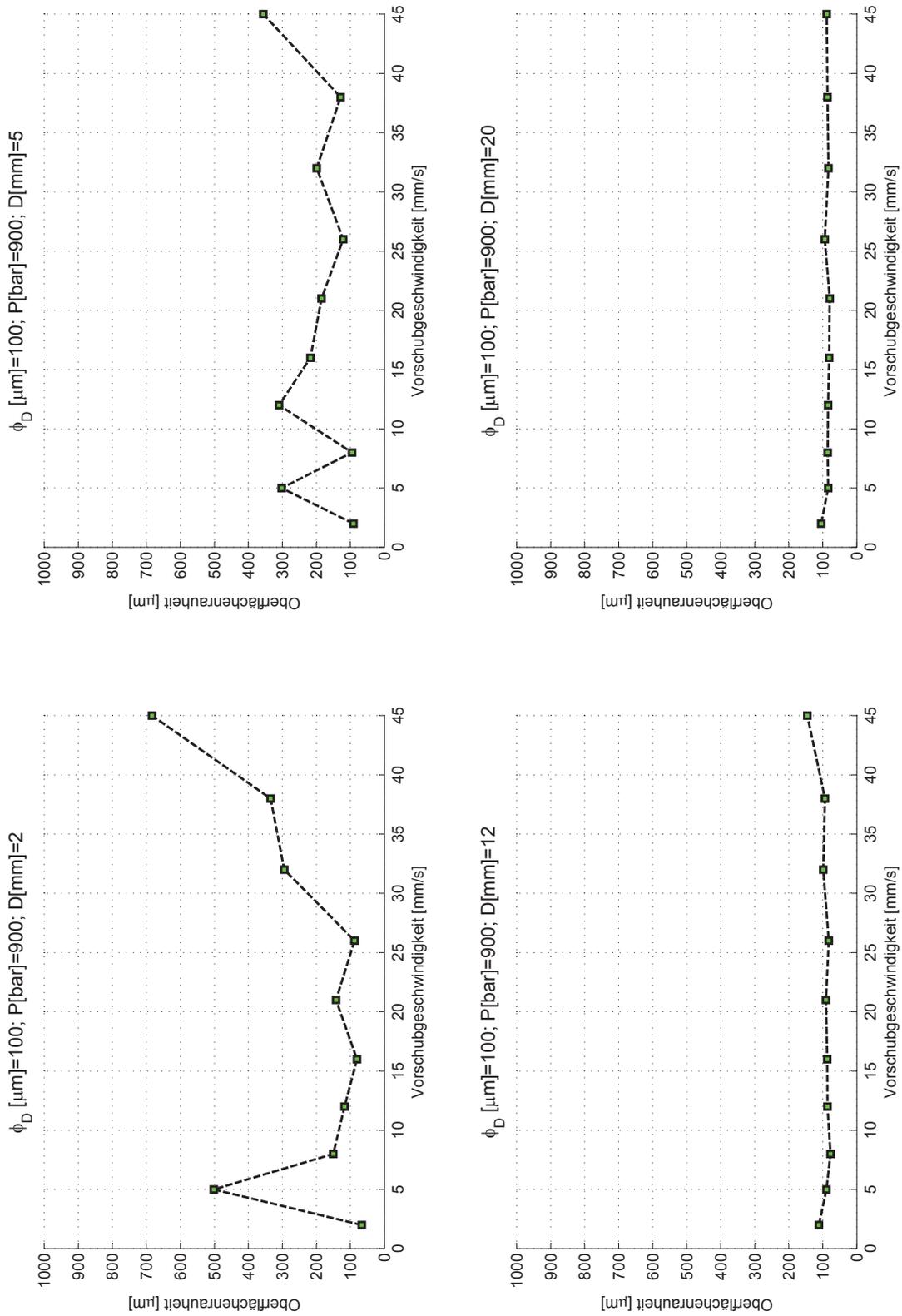


Abbildung A.8: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 100$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 900$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 12 \ 20]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v [\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

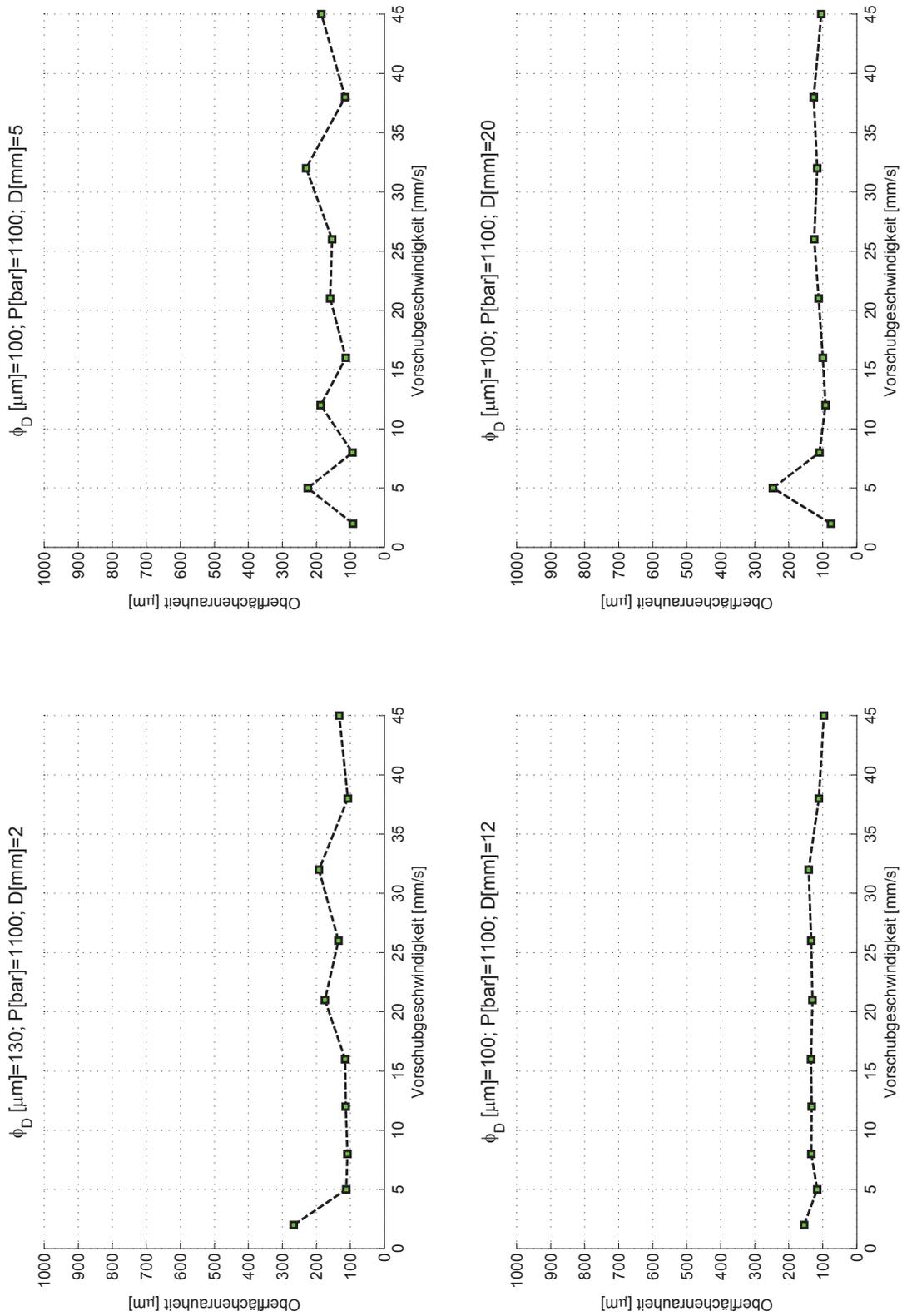


Abbildung A.9: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 100$ und einem Druck von $p [bar] = 1100$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

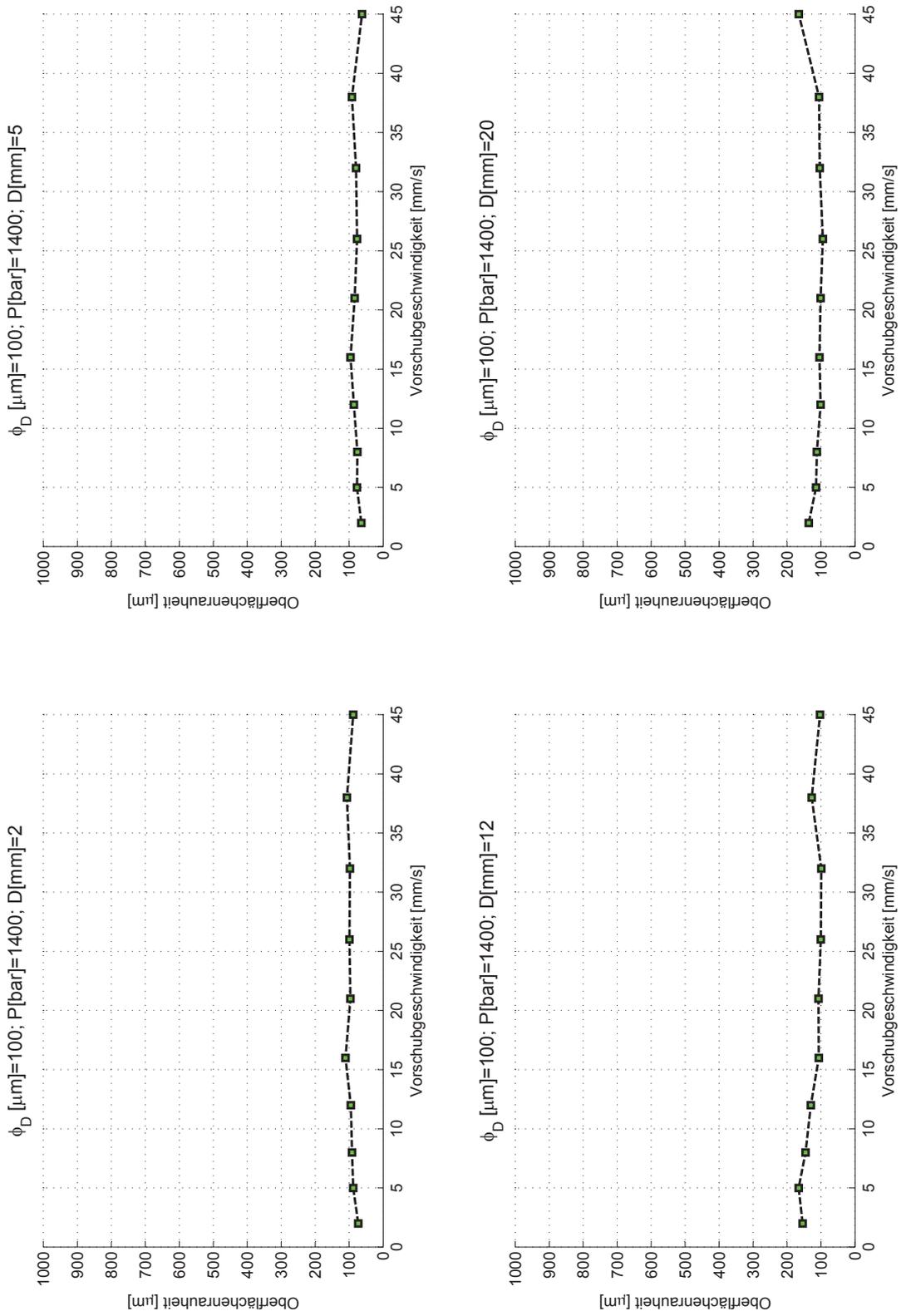


Abbildung A.10: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 100$ und einem Druck von $p [bar] = 1400$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

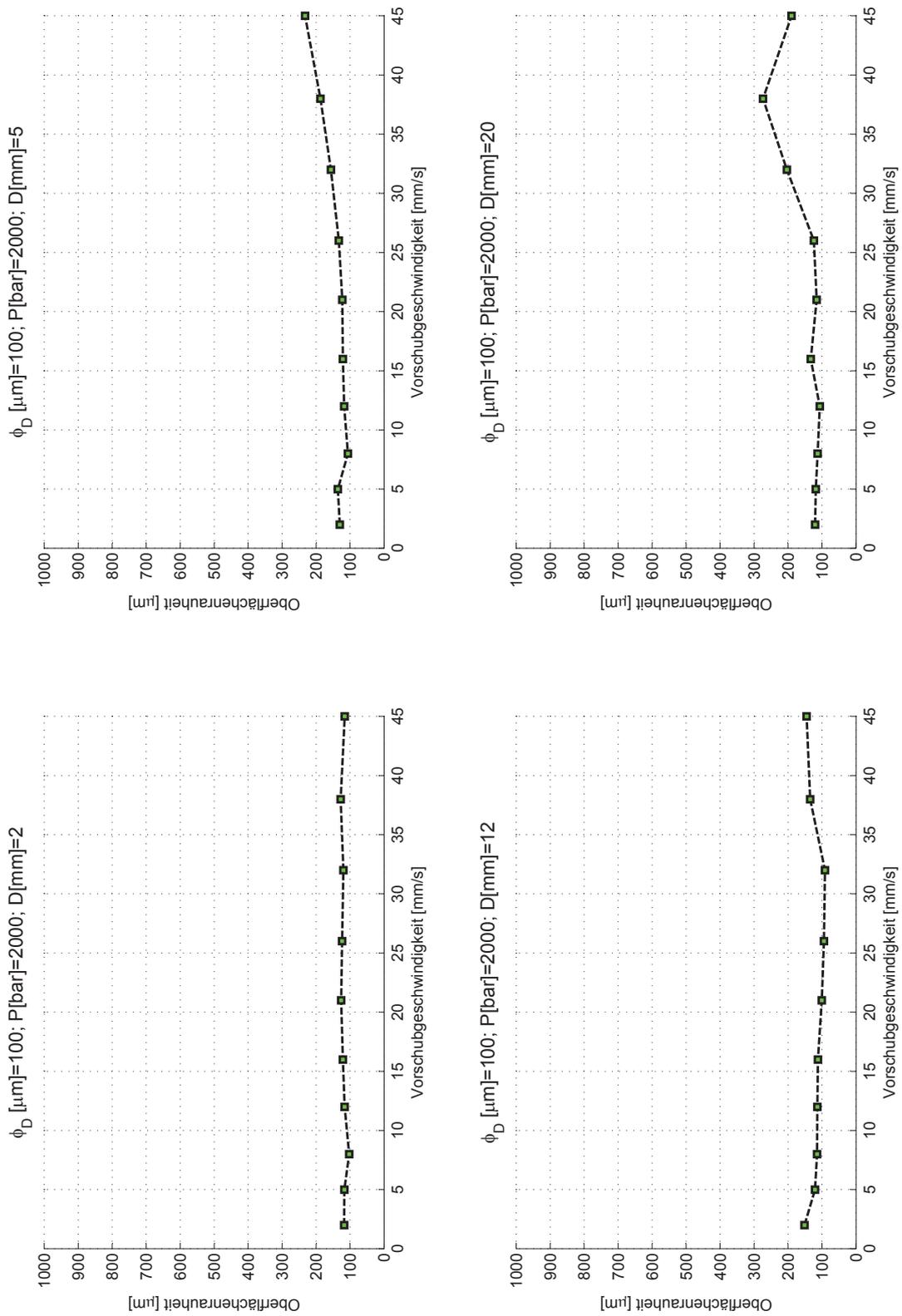


Abbildung A.11: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 100$ und einem Druck von $p [bar] = 2000$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

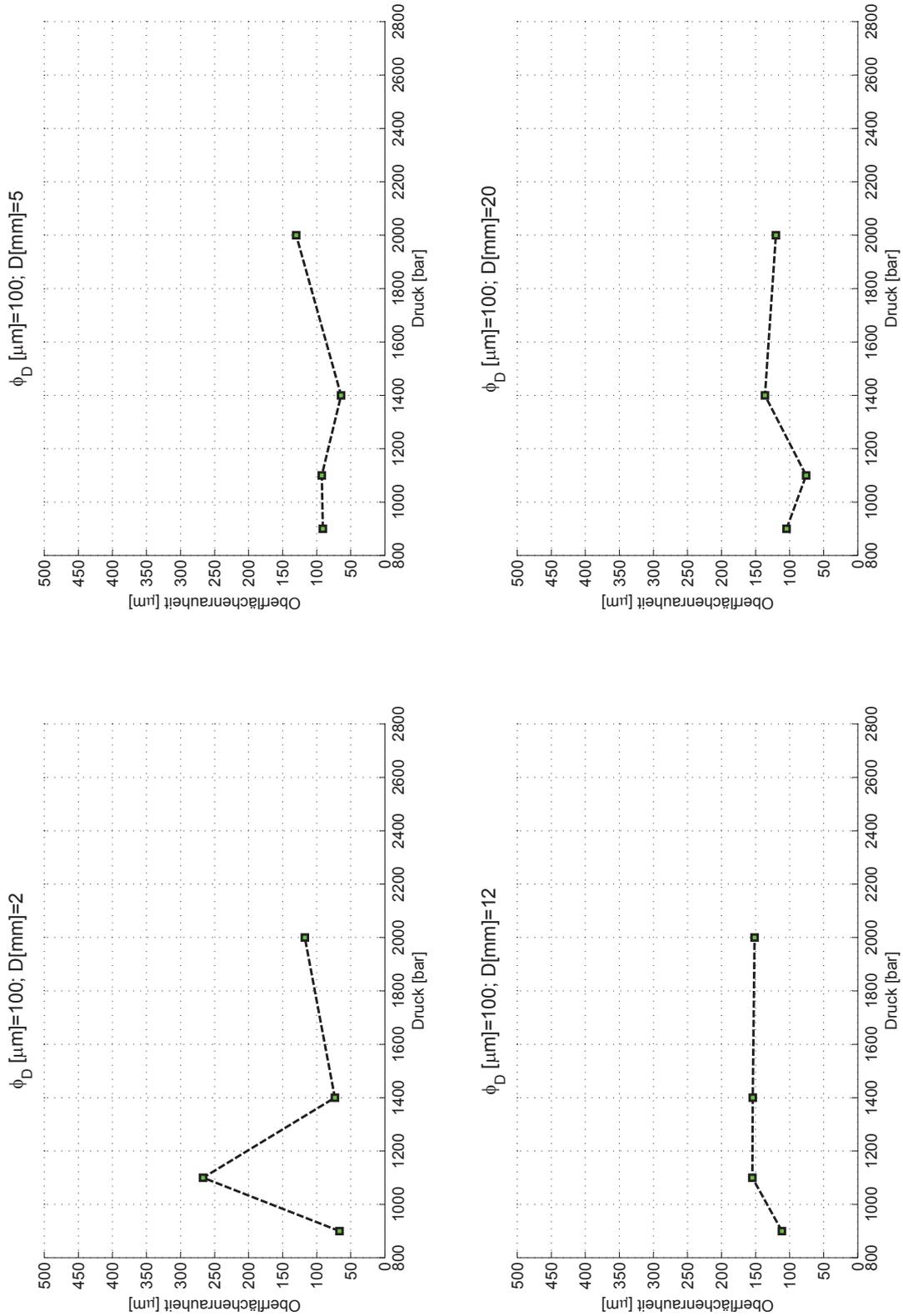


Abbildung A.12: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 100$ und einem Druckbereich von $p [bar] = [900 \ 1100 \ 1400 \ 2000]$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20]$ und einer konstanten Geschwindigkeit von $v [\frac{mm}{s}] = 2$

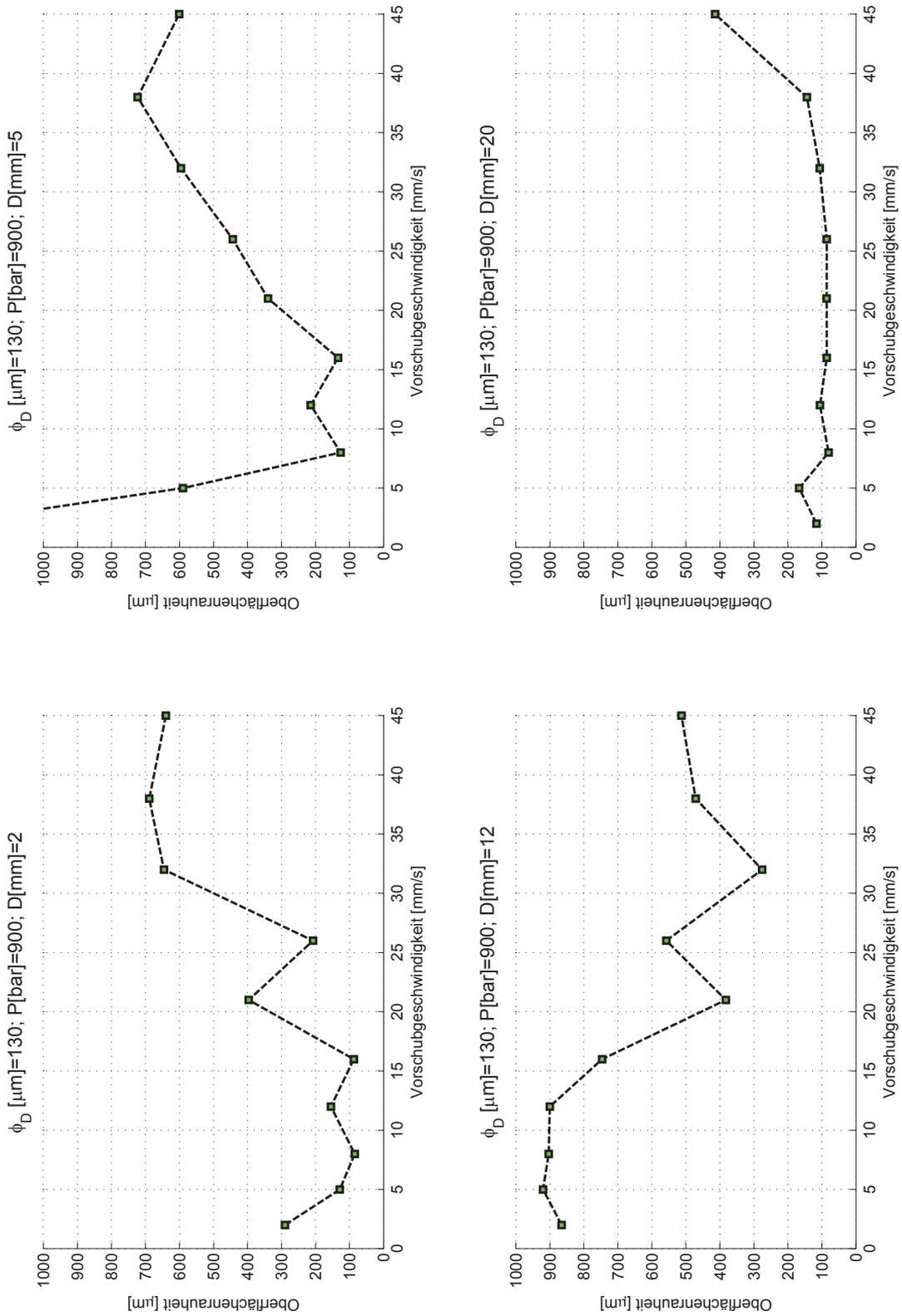


Abbildung A.13: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von ϕ_D [µm] = 130 und einem Druck von p [bar] = 900 mit Schneideabstandsvektor D [mm] = [2 5 8 12 16 21 26 32 38 45]

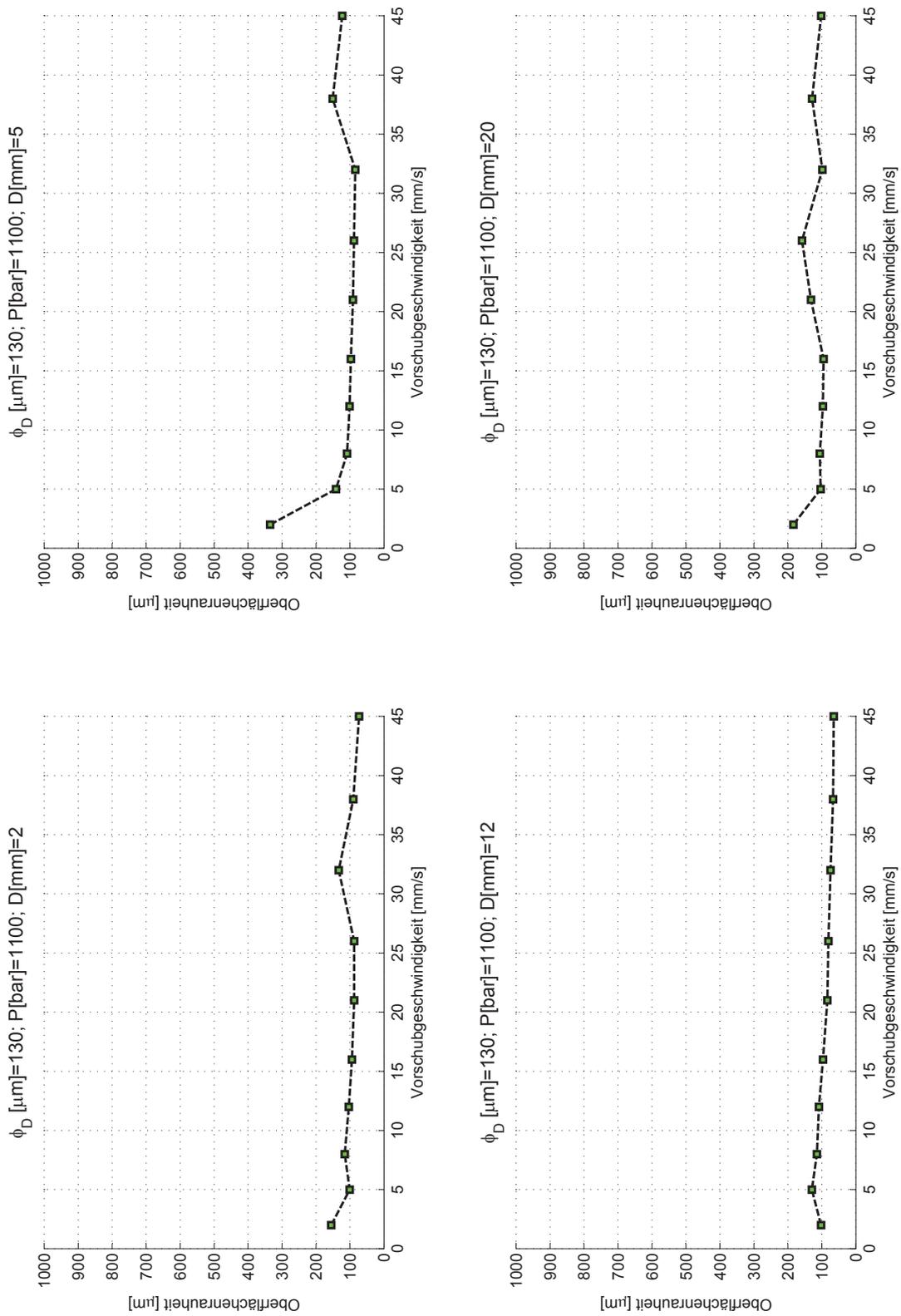


Abbildung A.14: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 130$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1100$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

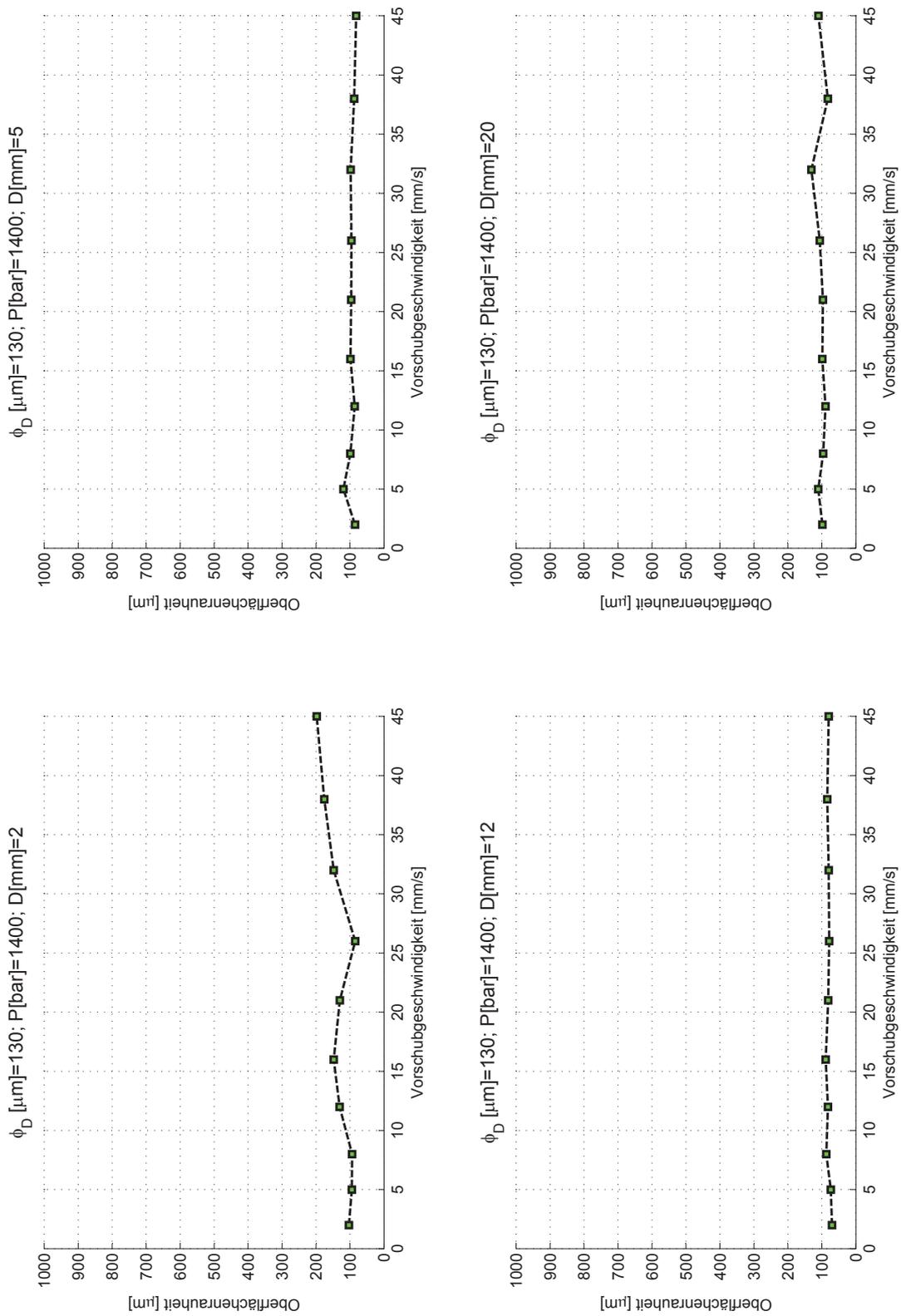


Abbildung A.15: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 130$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1400$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

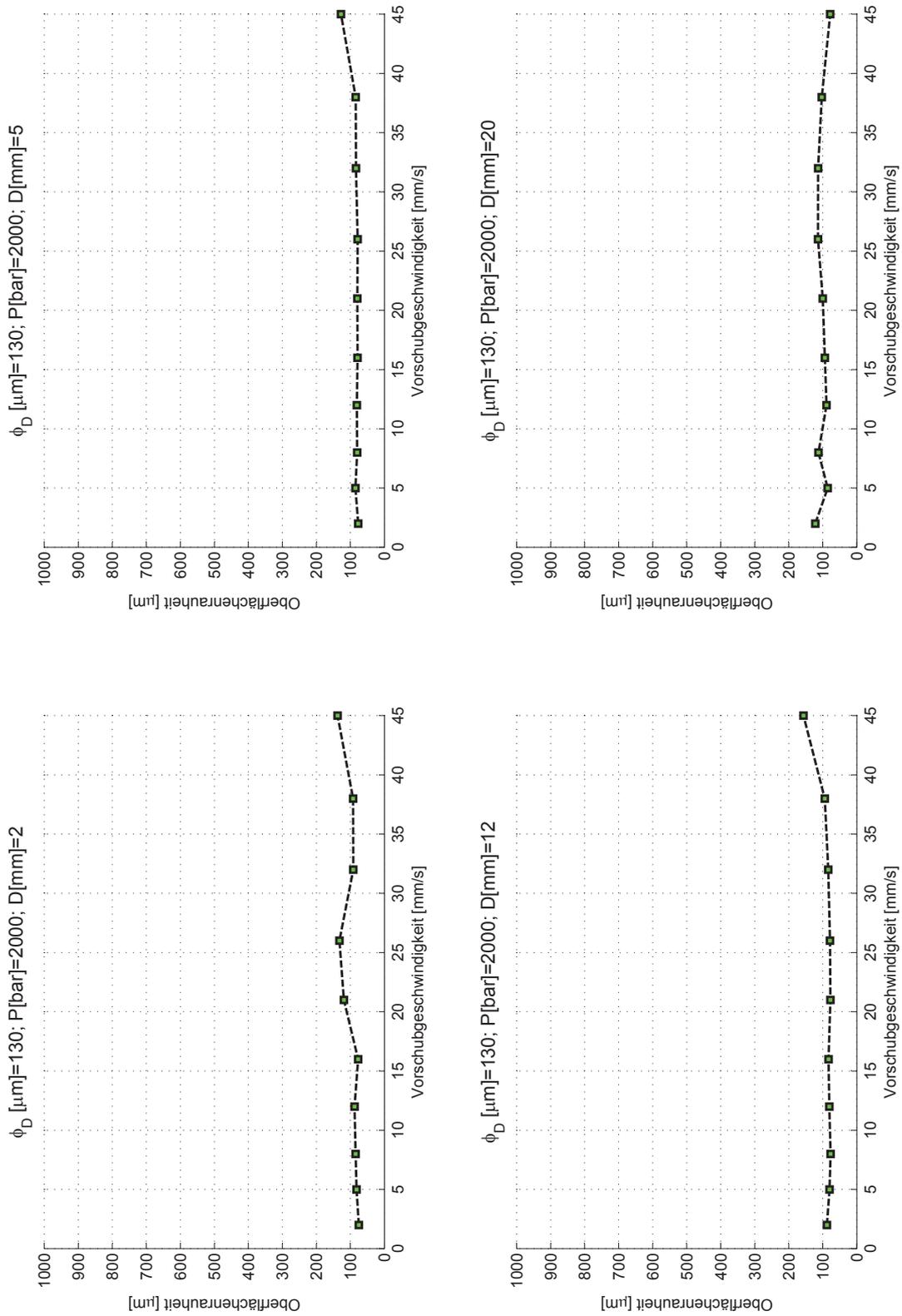


Abbildung A.16: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 130$ und einem Druck von $p [bar] = 2000$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

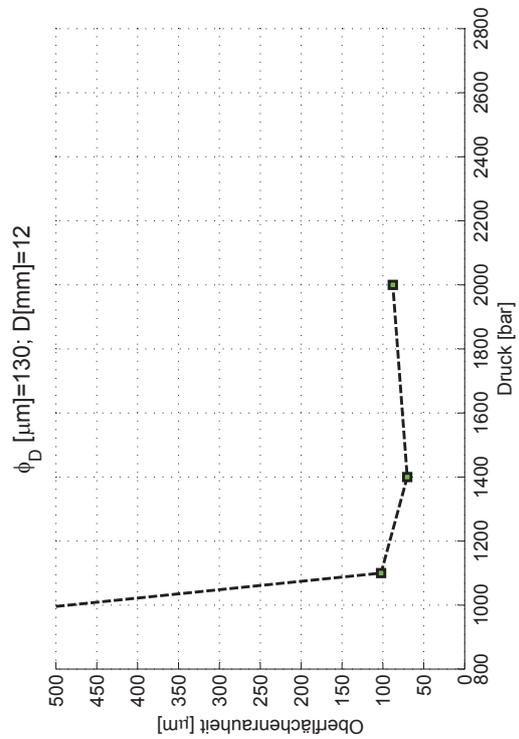
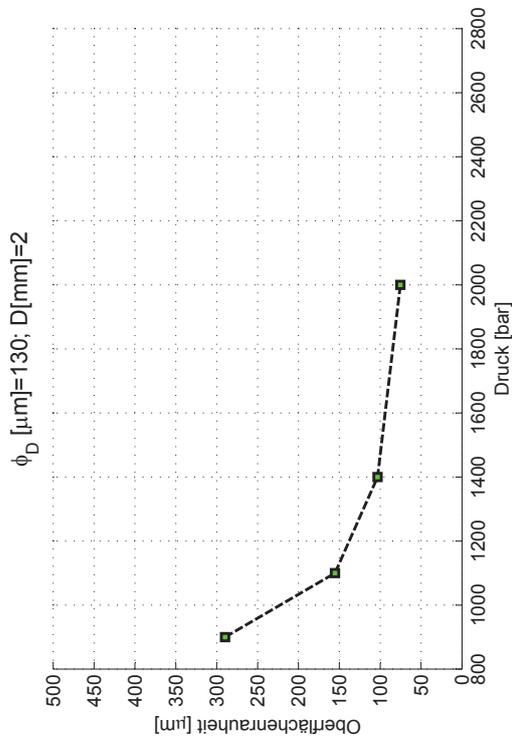
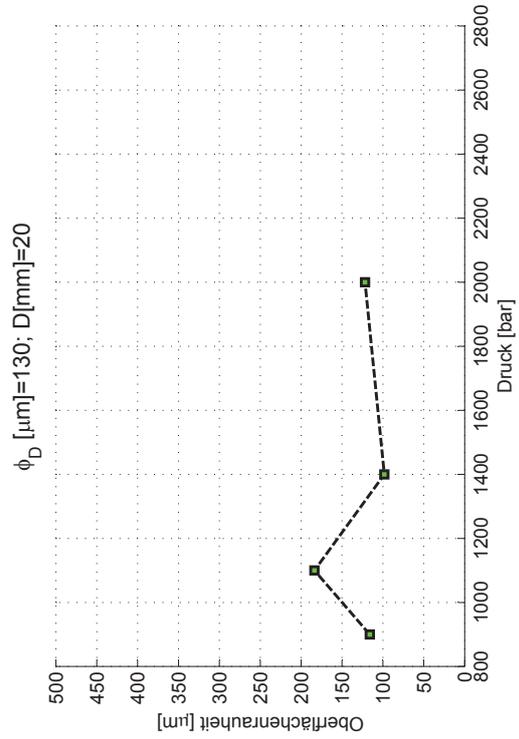
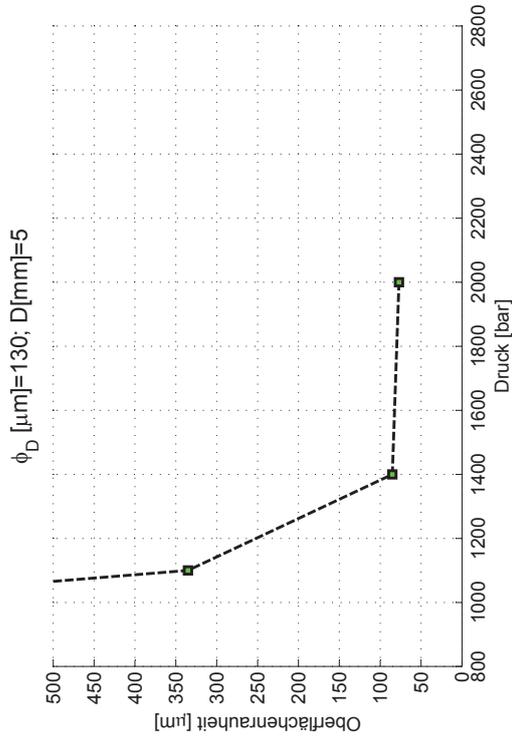


Abbildung A.17: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 130$ und einem Druckbereich von $p[\text{bar}] = [900 \ 1100 \ 1400 \ 2000]$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [2 \ 5 \ 12 \ 20]$ und einer konstanten Geschwindigkeit von $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = 2$

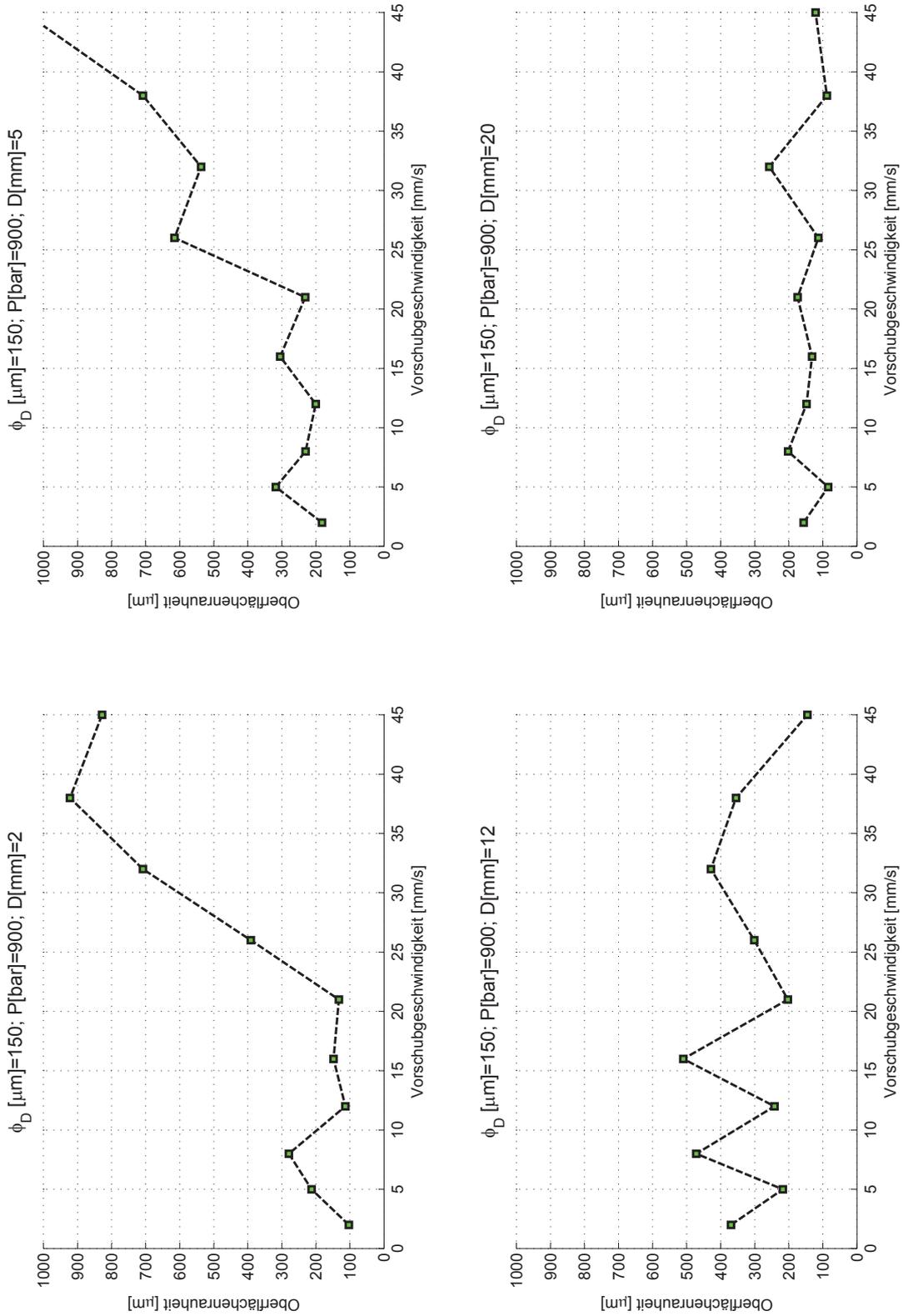


Abbildung A.18: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 900$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

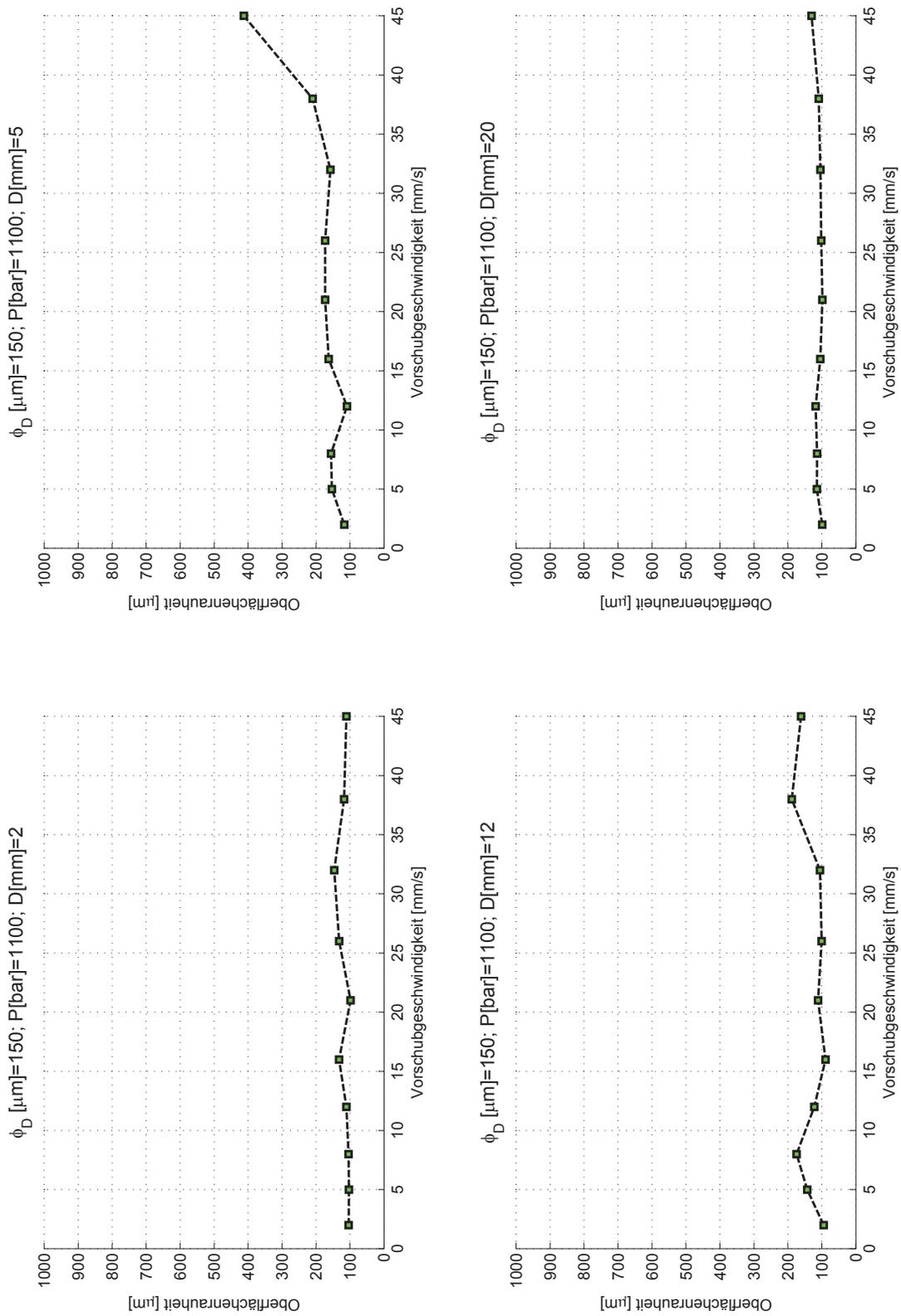


Abbildung A.19: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1100$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

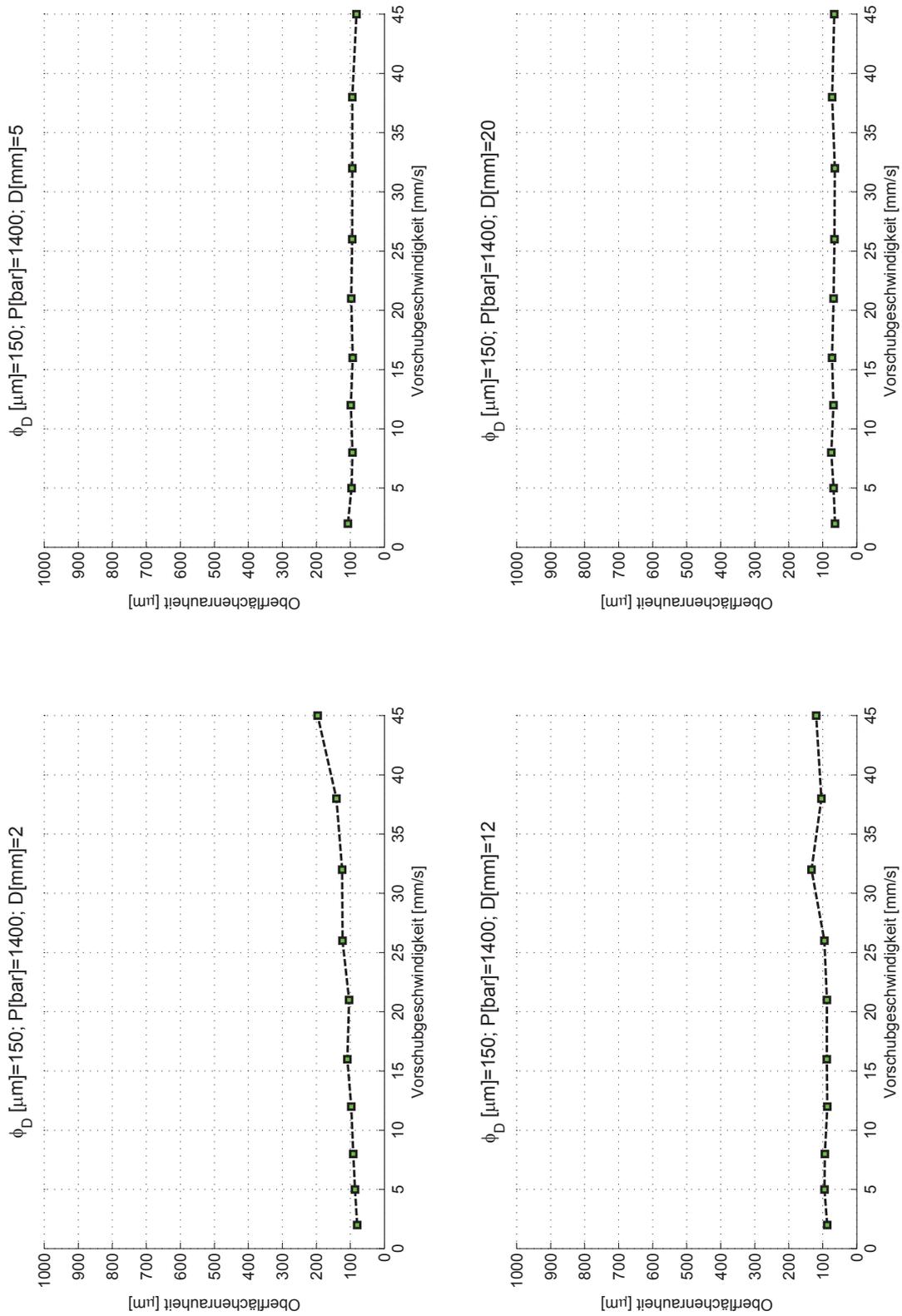


Abbildung A.20: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1400$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

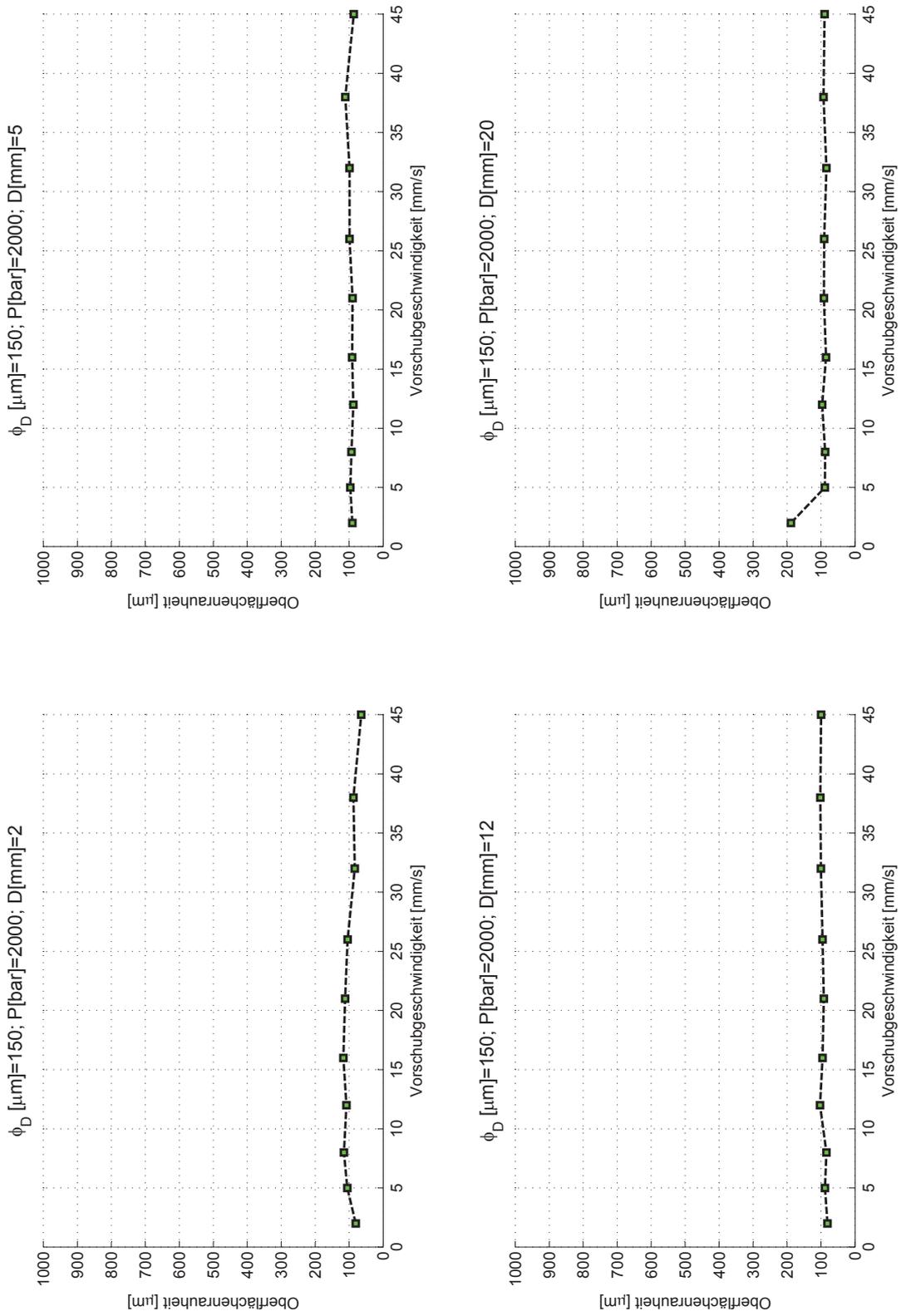


Abbildung A.21: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 2000$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

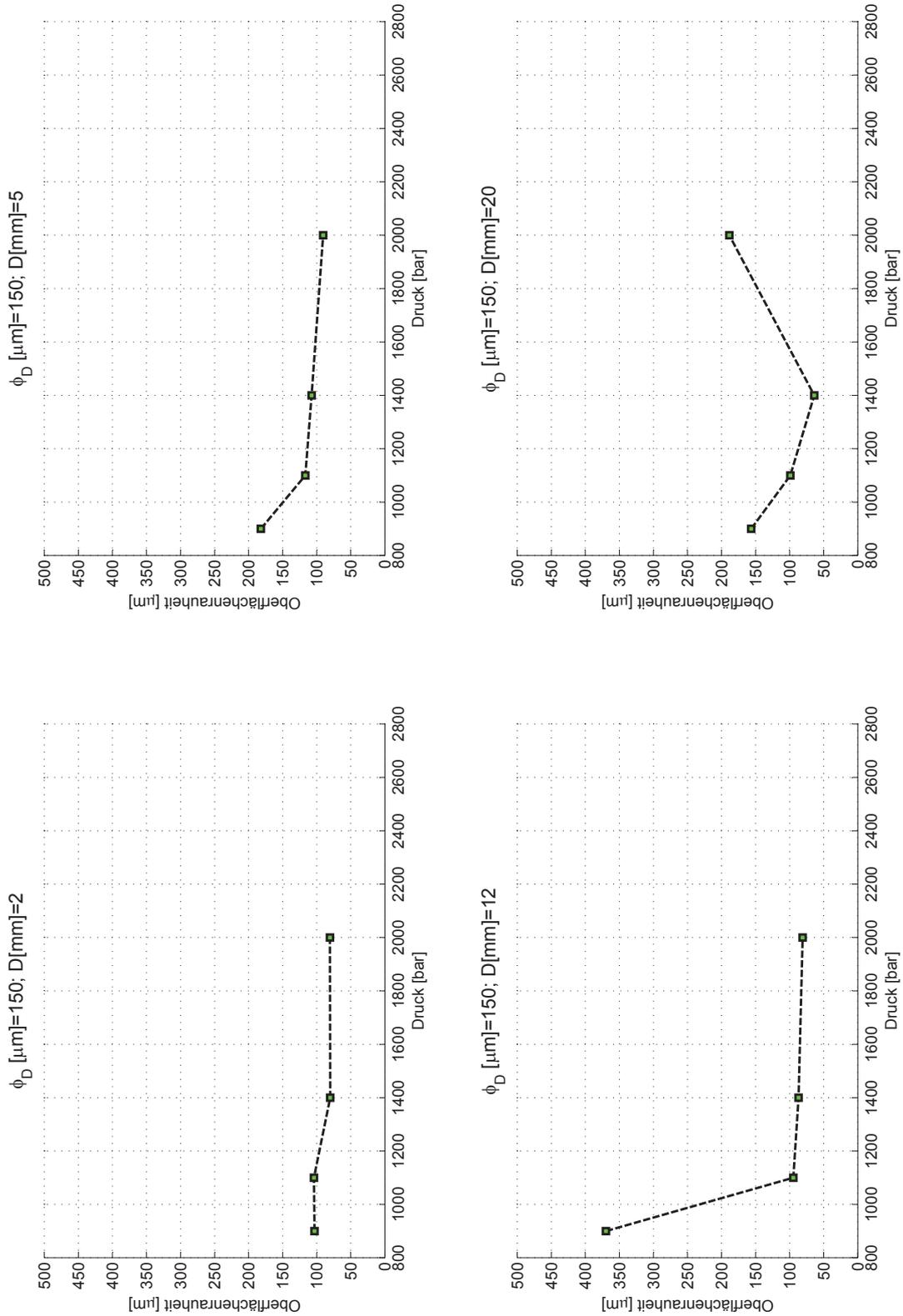


Abbildung A.22: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 150$ und einem Druckbereich von $p [bar] = [900 \ 1100 \ 1400 \ 2000]$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20]$ und einer konstanten Geschwindigkeit von $v [\frac{mm}{s}] = 2$

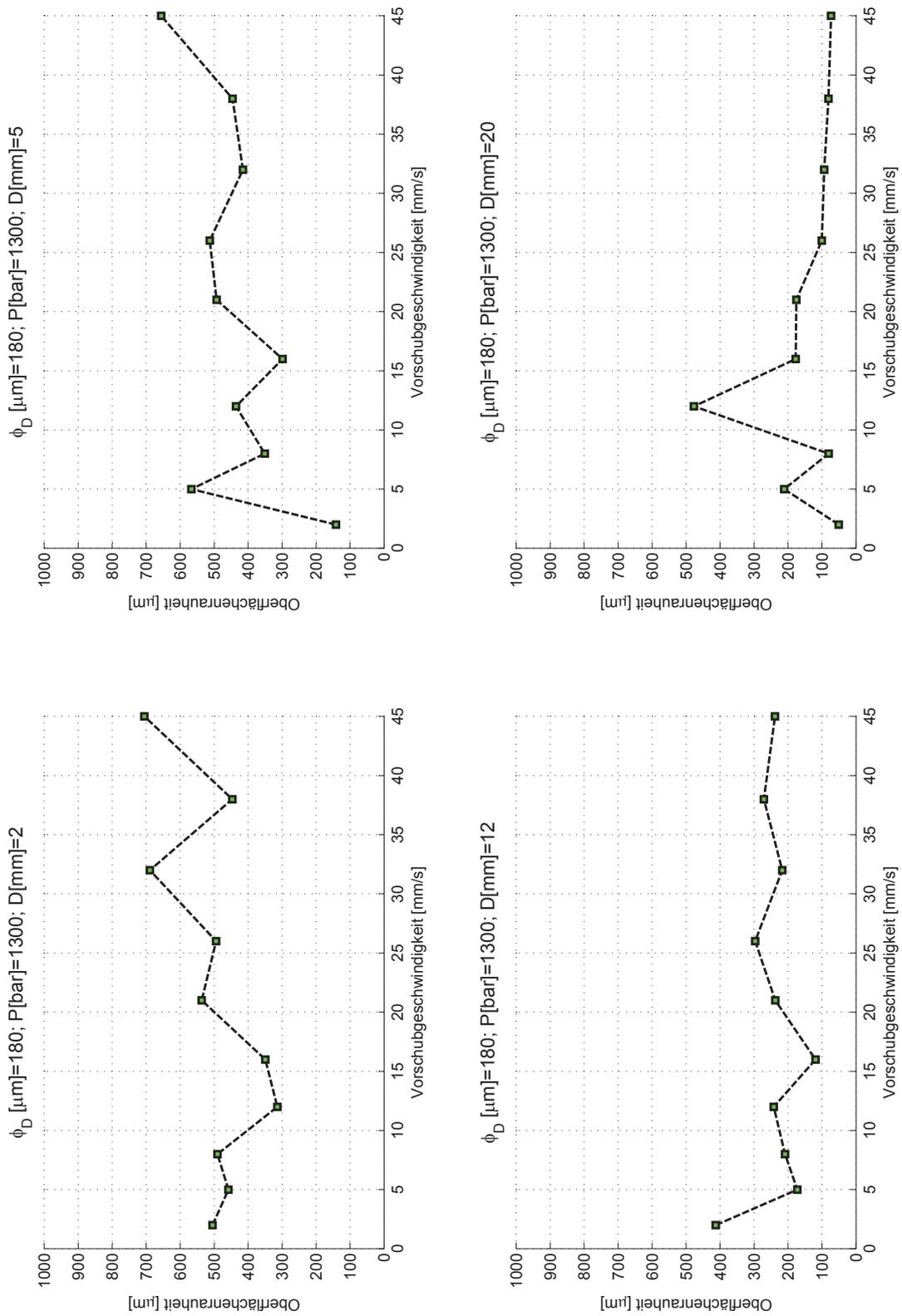


Abbildung A.23: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 180$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1300$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

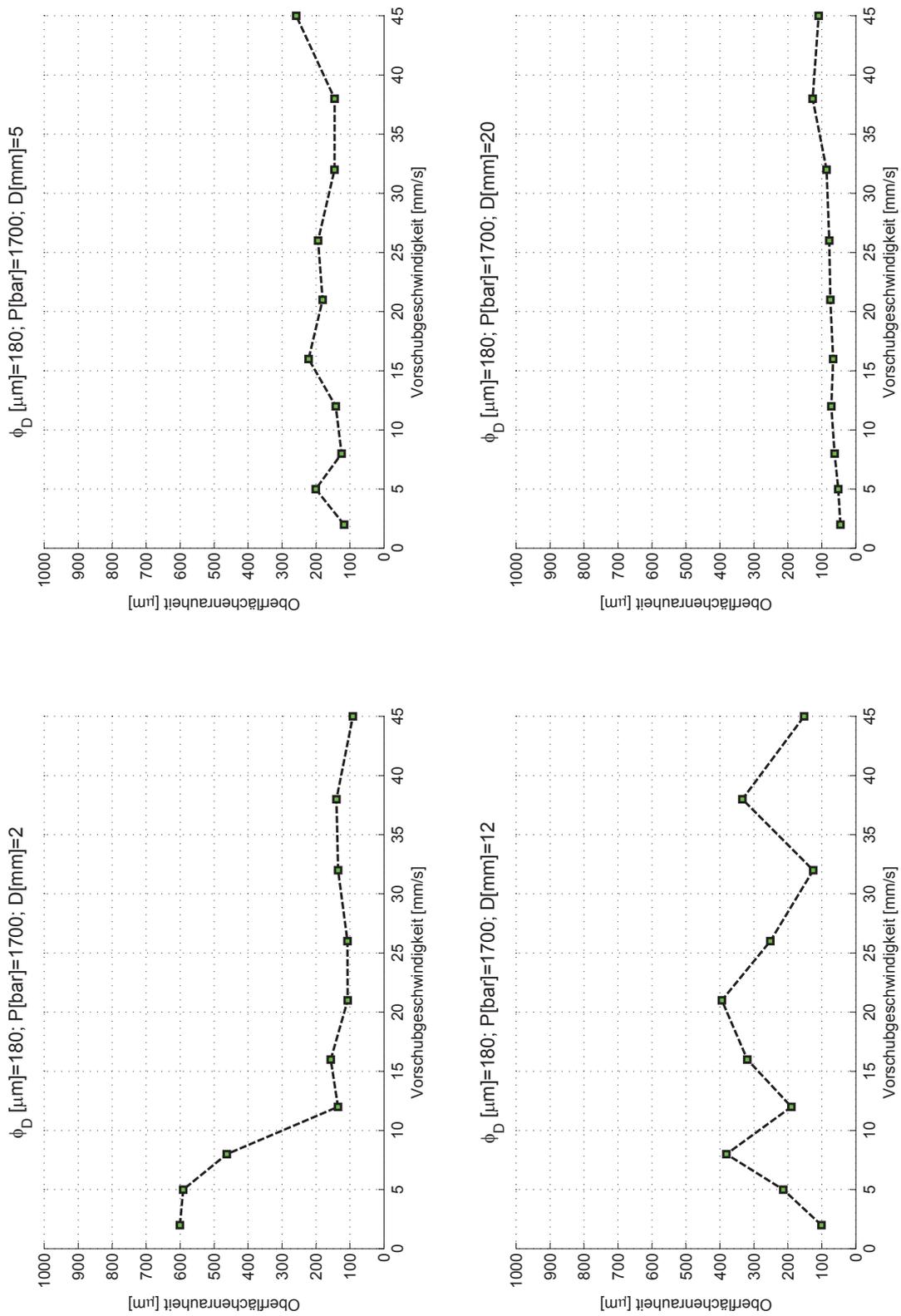


Abbildung A.24: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 180$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 1700$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

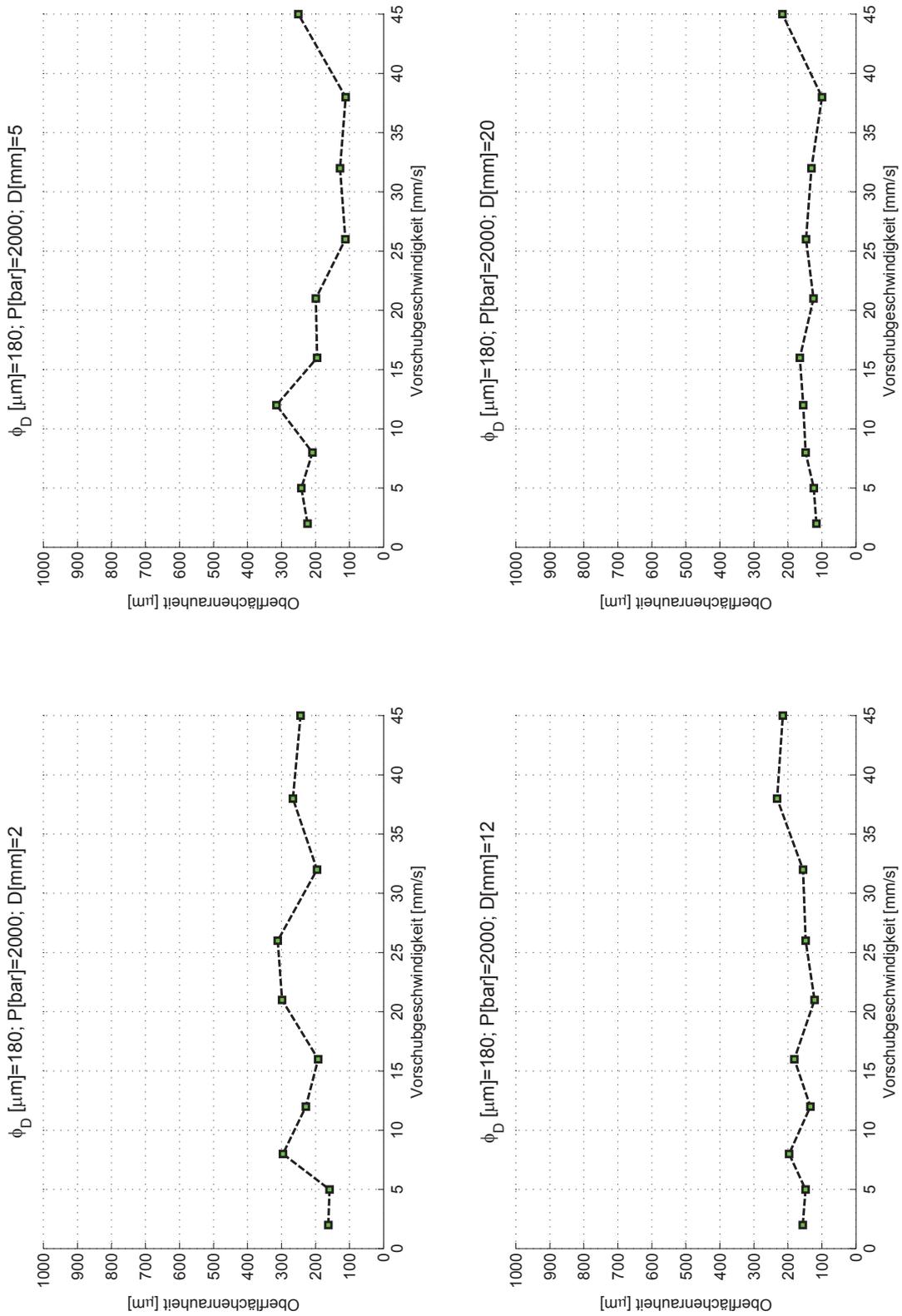


Abbildung A.25: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 180$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = 2000$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [2 \ 5 \ 8 \ 12 \ 16 \ 21 \ 26 \ 32 \ 38 \ 45]$

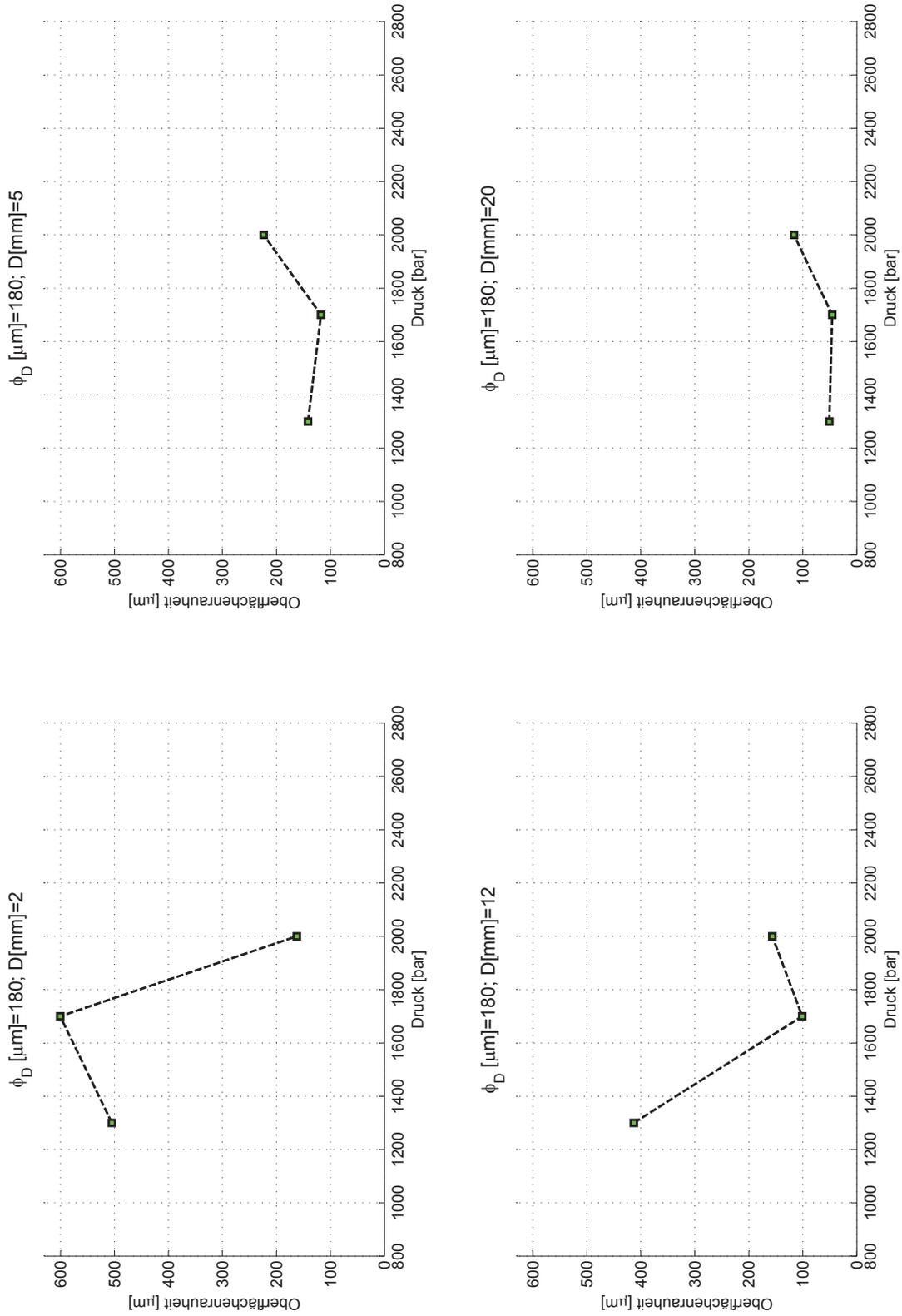


Abbildung A.26: Ergebnisse des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 180$ und einem Druckbereich von $p [bar] = [1300 \ 1700 \ 2000]$ mit Schneideabstandsvektor $D [mm] = [2 \ 5 \ 12 \ 20]$ und einer konstanten Geschwindigkeit von $v [\frac{mm}{s}] = 2$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

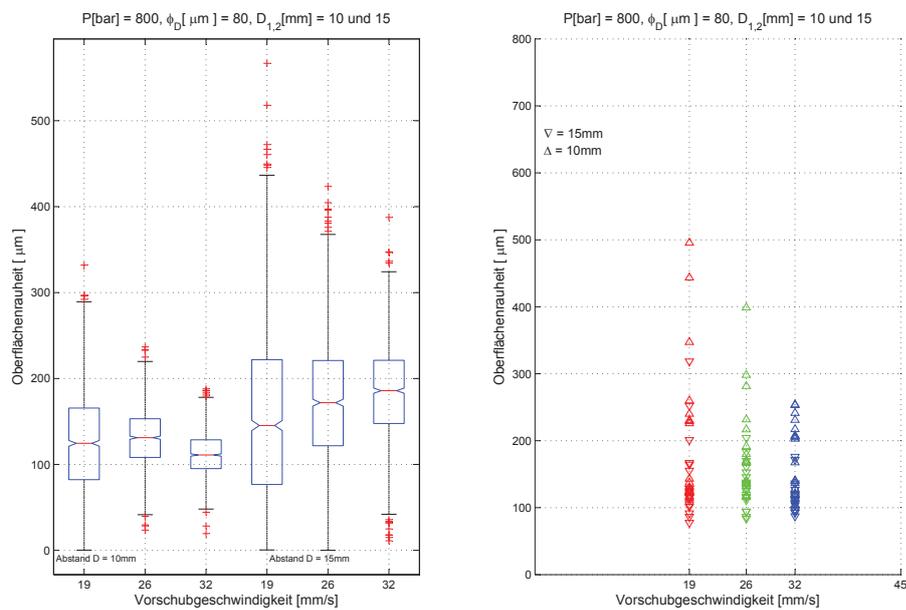


Abbildung B.1: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 800$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

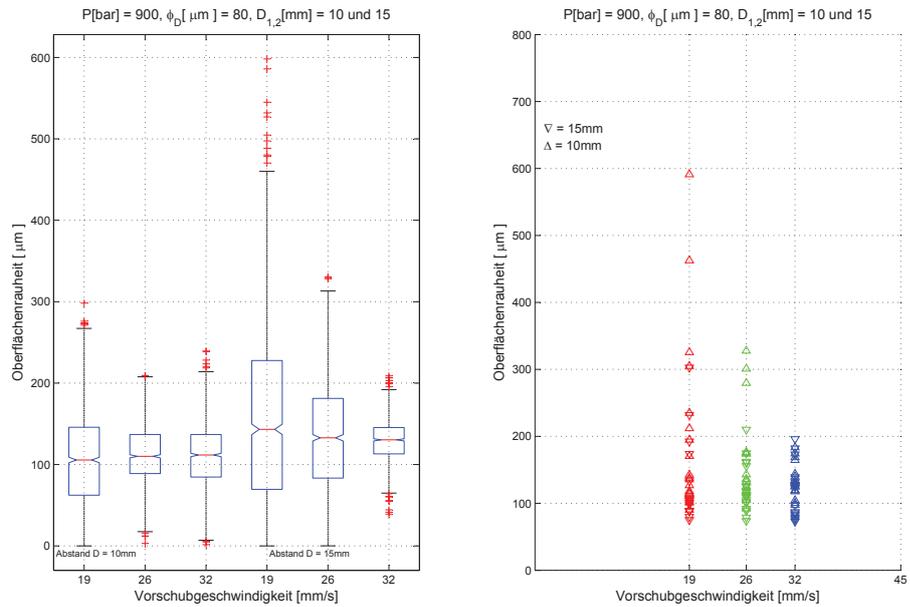


Abbildung B.2: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 900$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

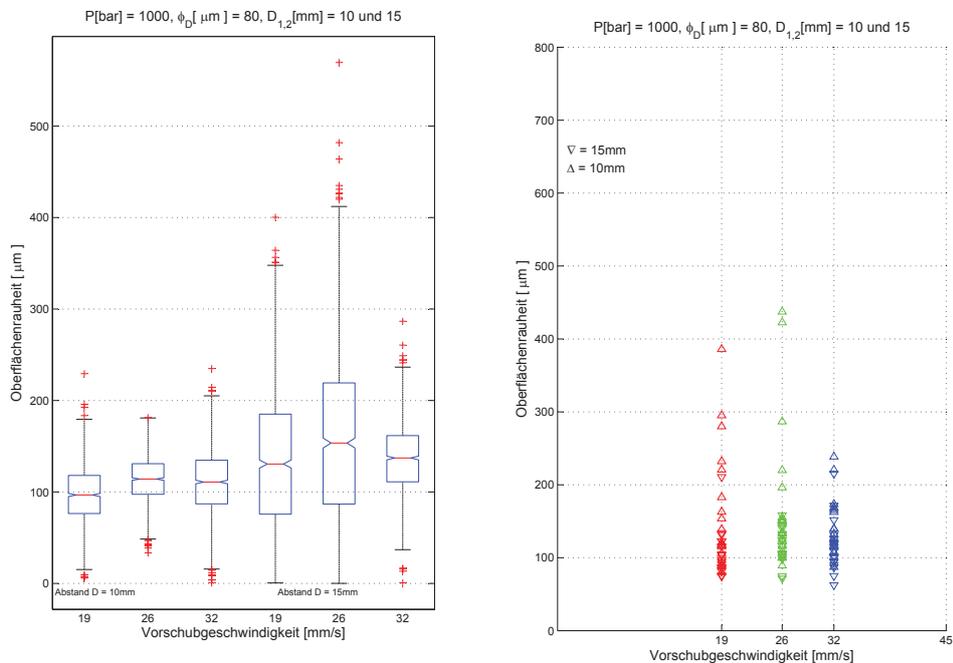


Abbildung B.3: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1000$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

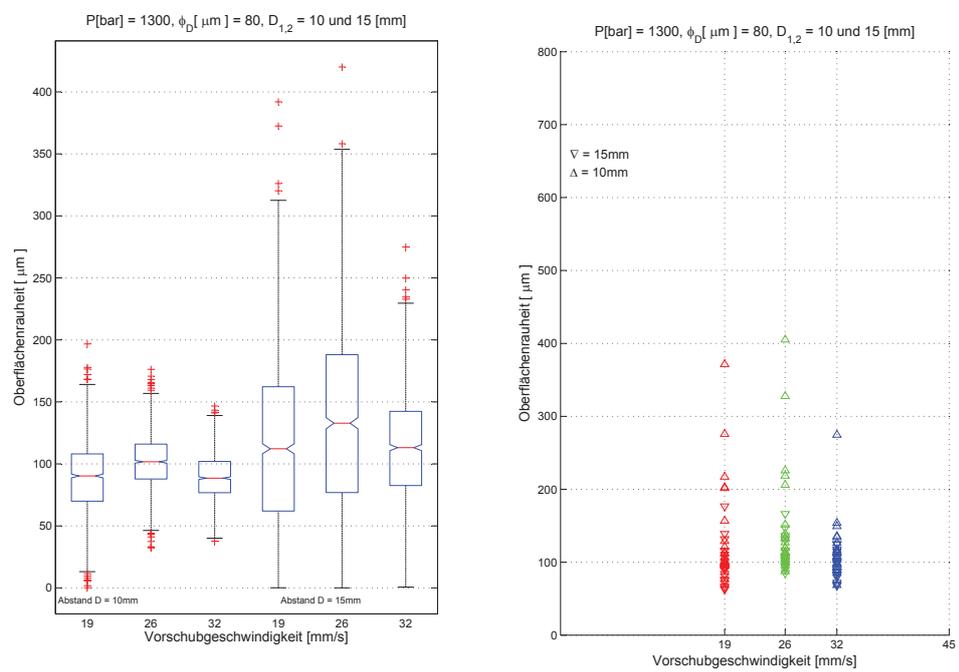


Abbildung B.4: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 80$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1300$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

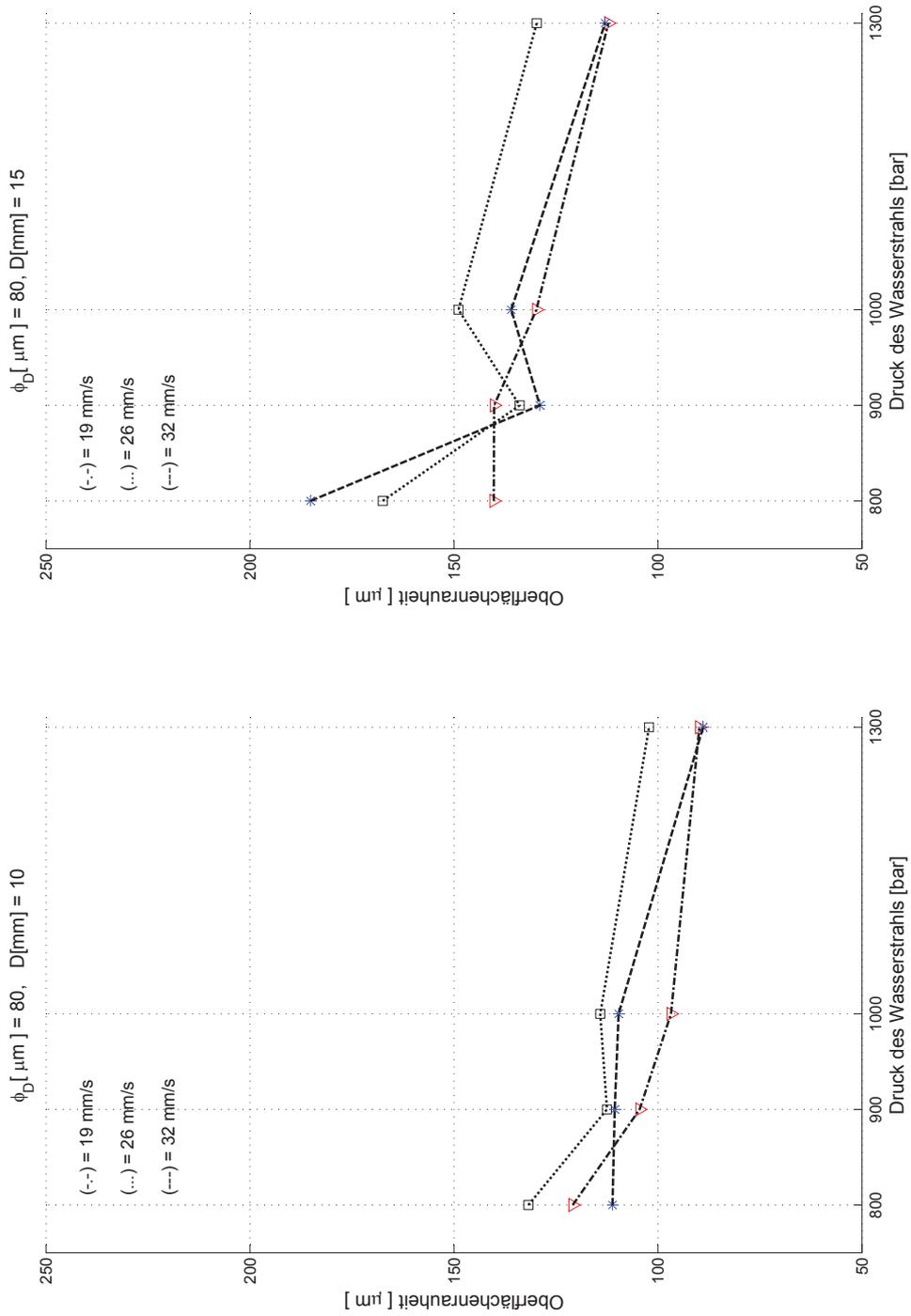


Abbildung B.5: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu m] = 80$ und einem Druck von $p [\text{bar}] = [800, 900, 1000, 1300]$ mit Schneideabstandsvektor $D [\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v [\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter
mittels Oberflächenrauheit

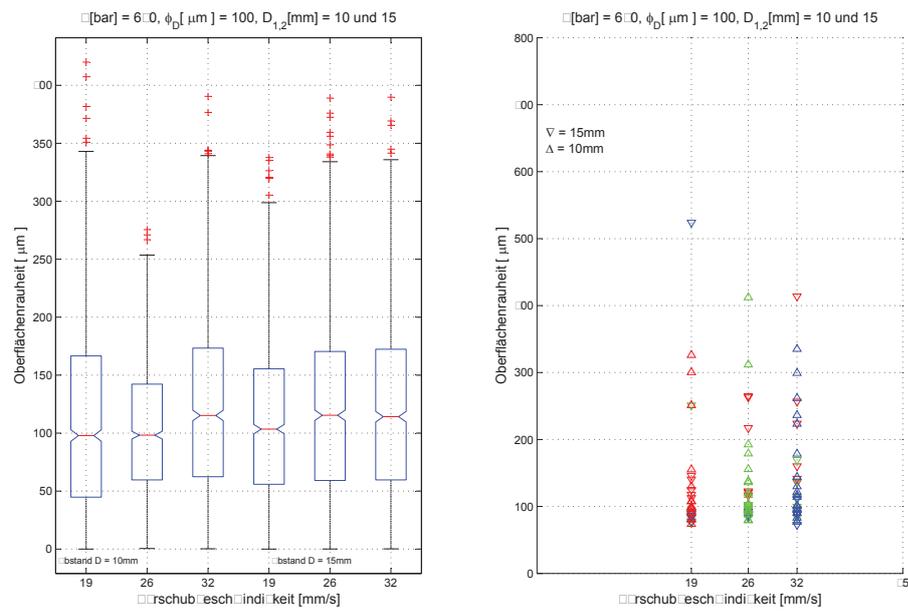


Abbildung B.6: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 670$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

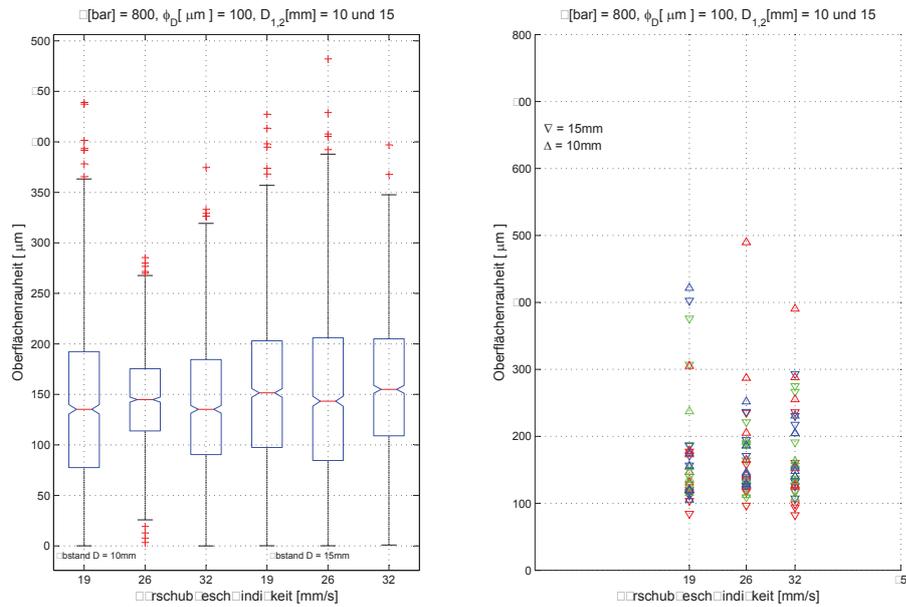


Abbildung B.7: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 800$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

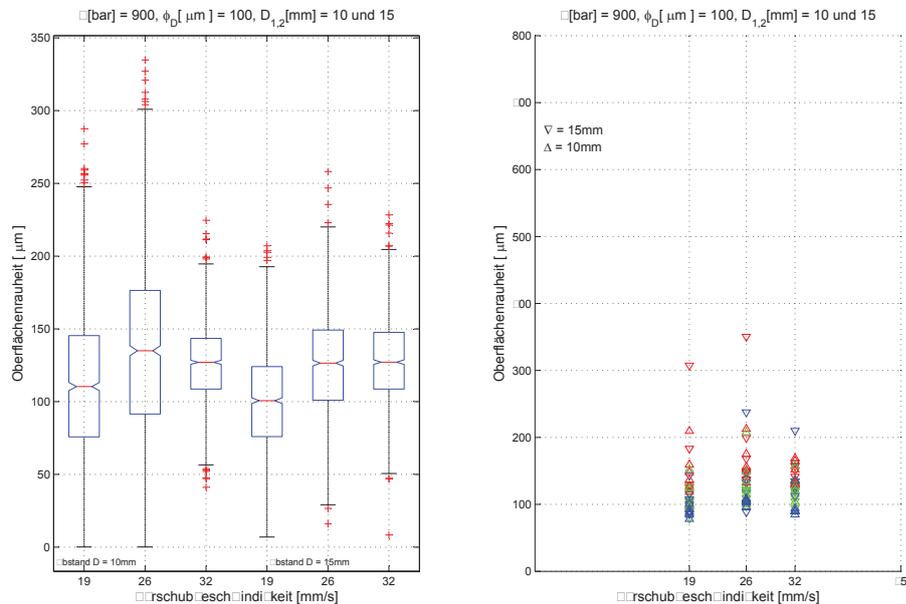


Abbildung B.8: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 900$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

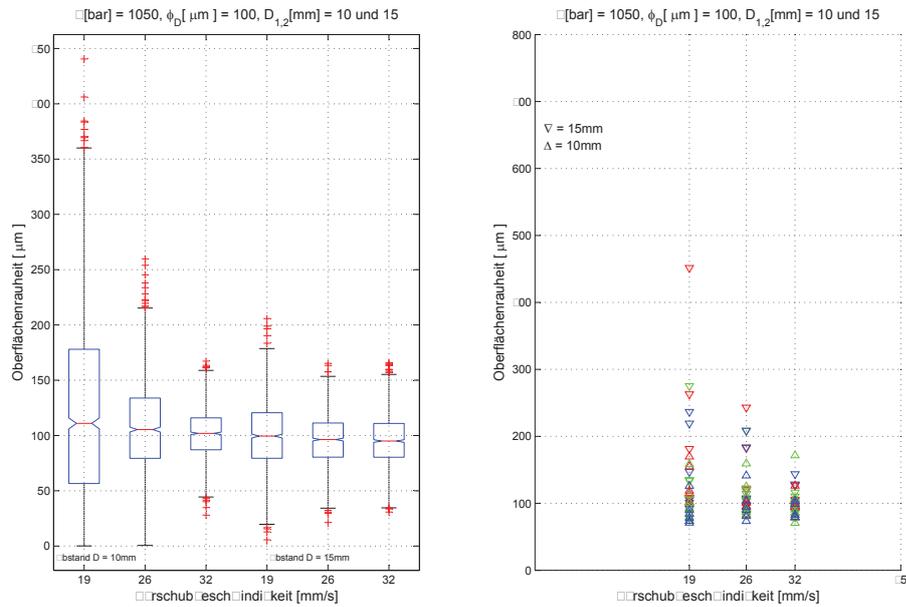


Abbildung B.9: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 1050$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

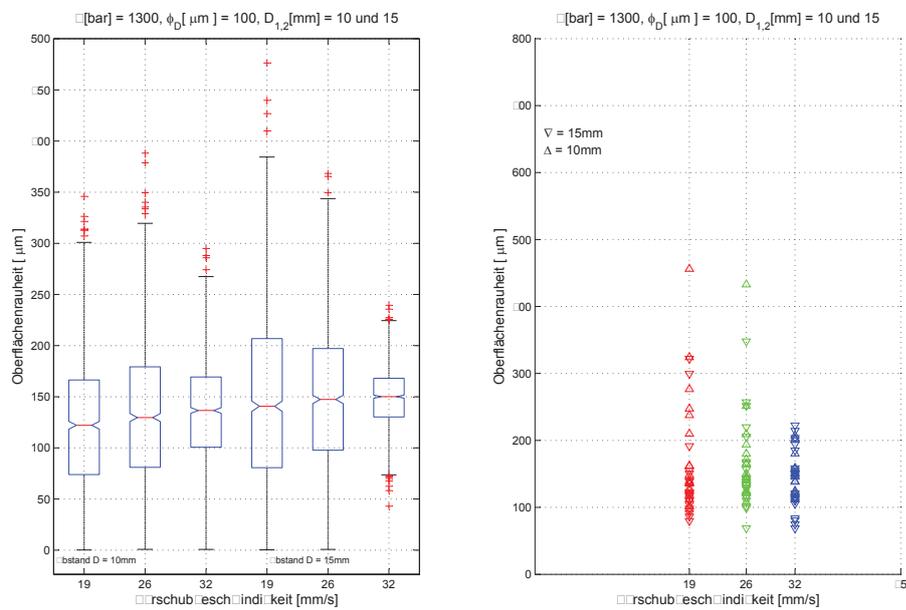


Abbildung B.10: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 100$ und einem Druck von $p[bar] = 1300$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

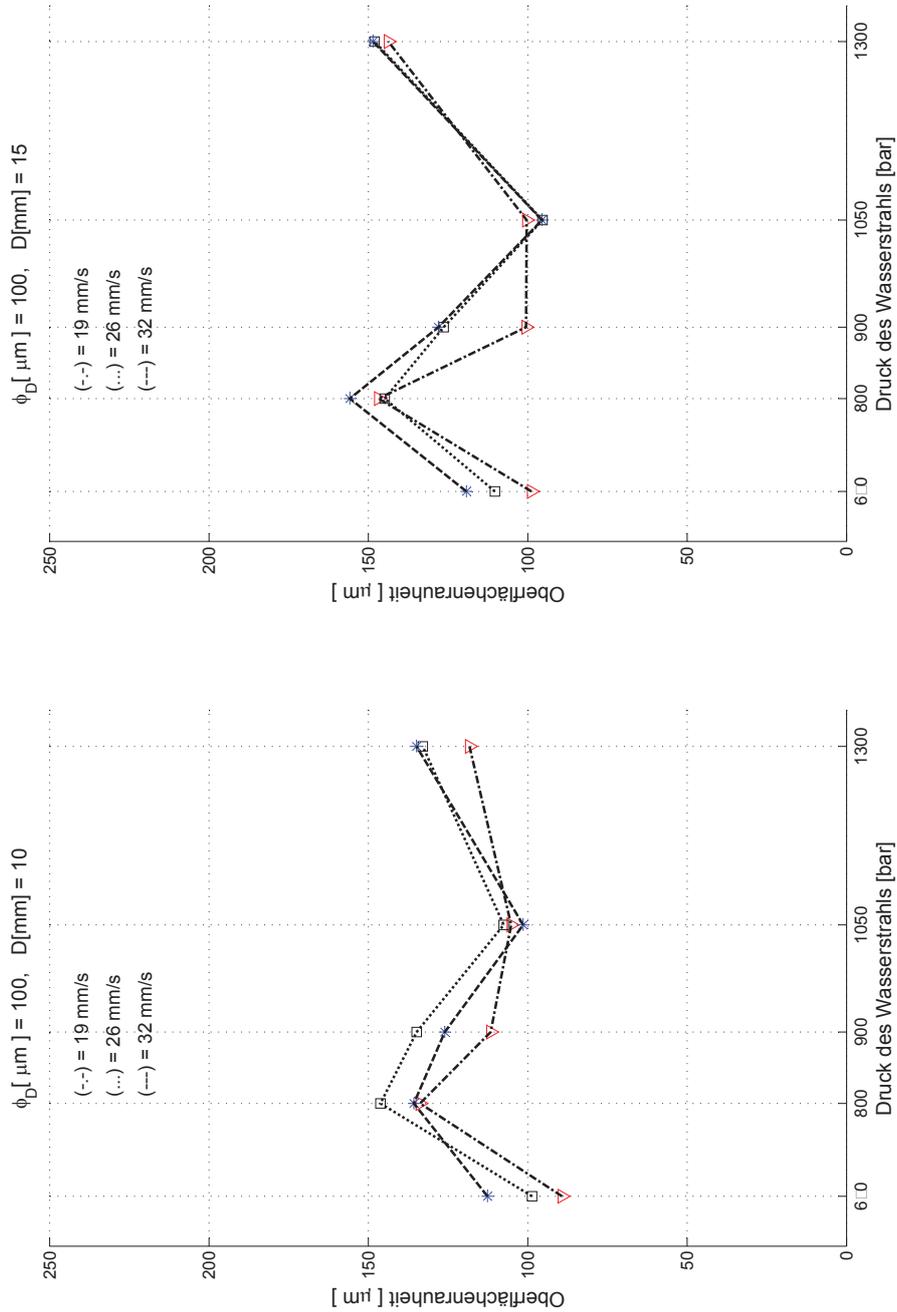


Abbildung B.11: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 100$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = [670, 800, 900, 1050, 1300]$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10, 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19, 26, 32]$

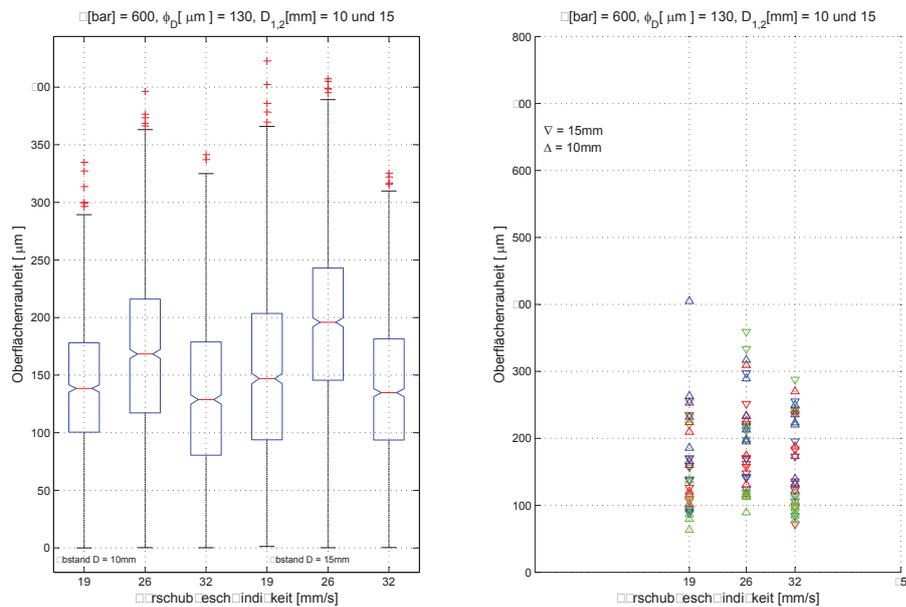


Abbildung B.12: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 130$ und einem Druck von $p[bar] = 600$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

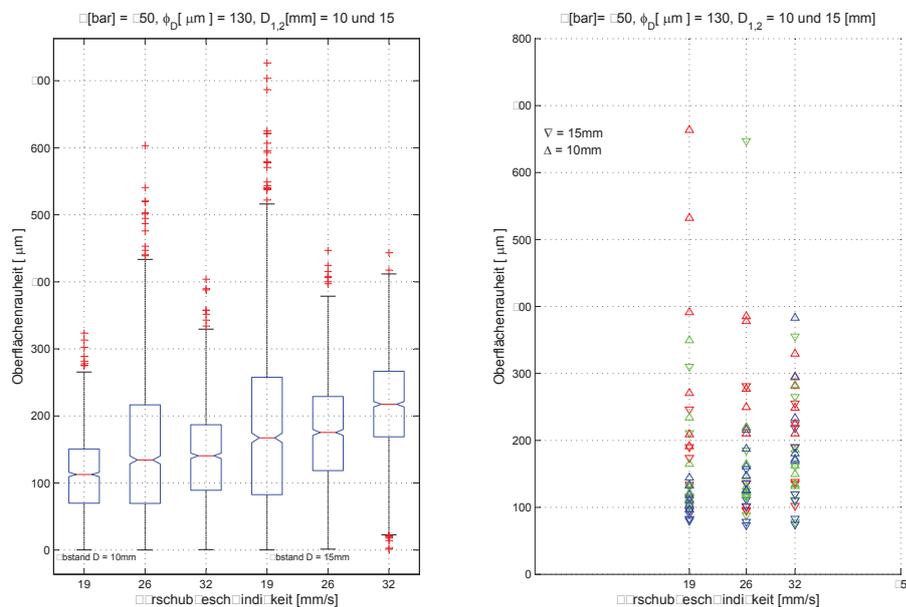


Abbildung B.13: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu m] = 130$ und einem Druck von $p[bar] = 750$ mit Schneideabstandsvektor $D[mm] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{mm}{s}] = [19 \ 26 \ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

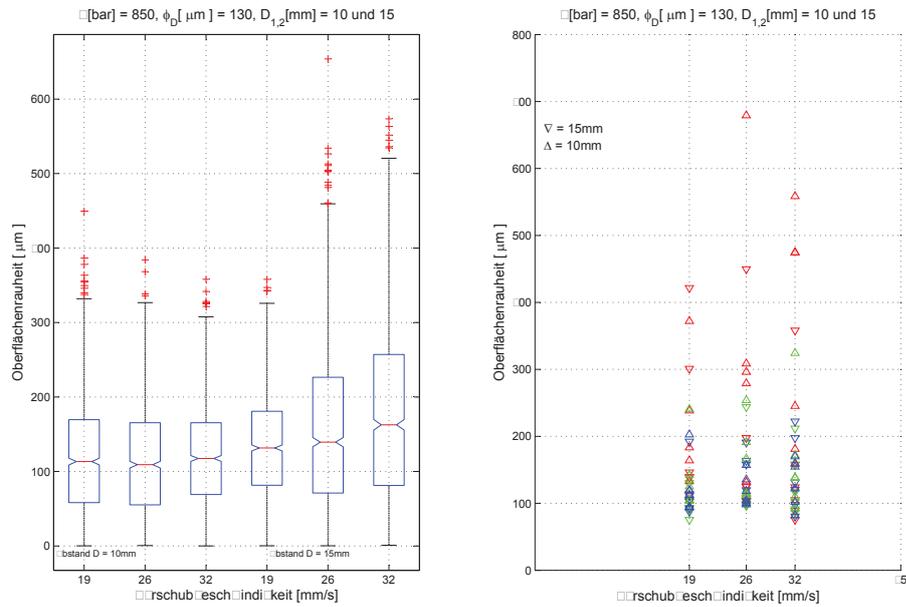


Abbildung B.14: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 130$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 850$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

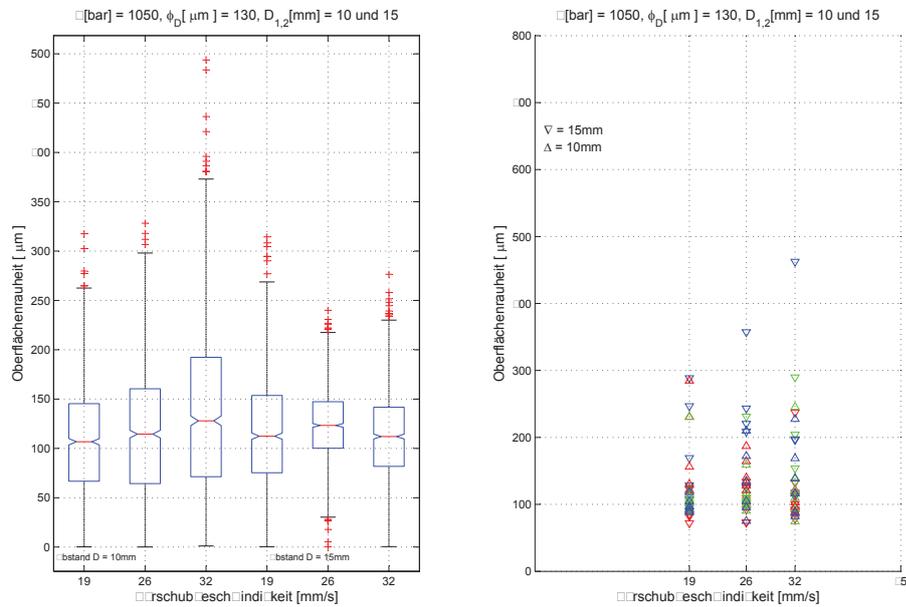


Abbildung B.15: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 130$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1050$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

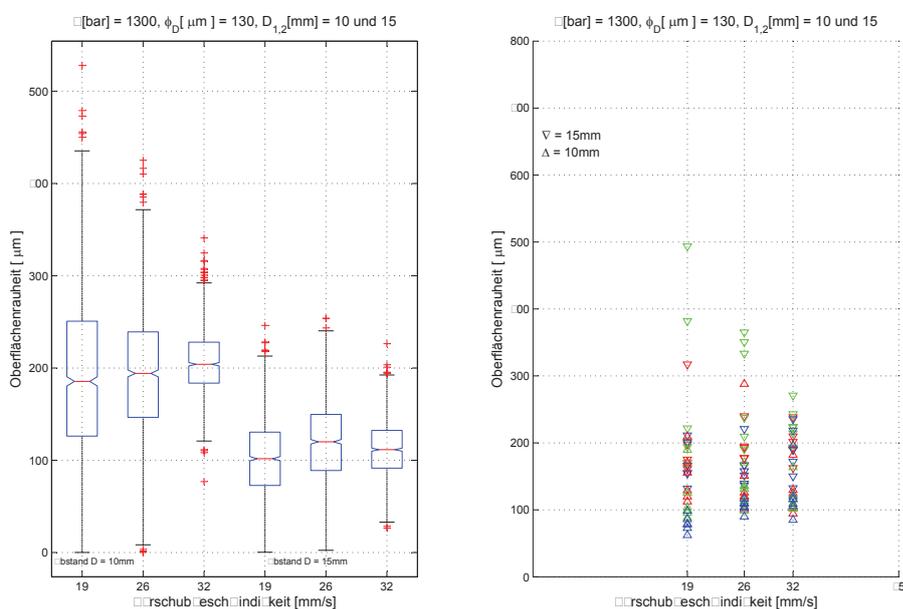


Abbildung B.16: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 130$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1300$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

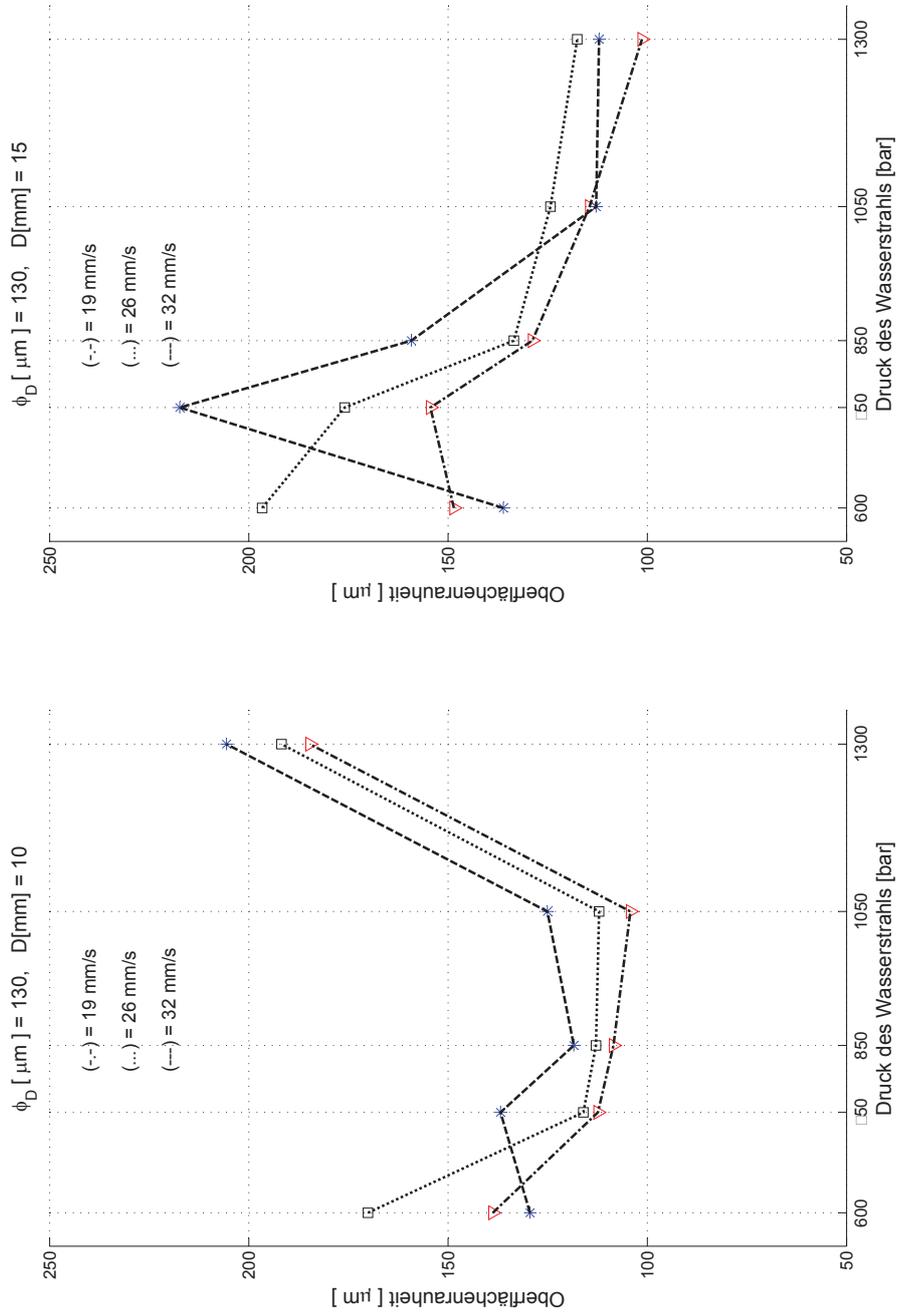


Abbildung B.17: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D [\mu\text{m}] = 100$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = [670$
 750 850 1050, 1300] mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

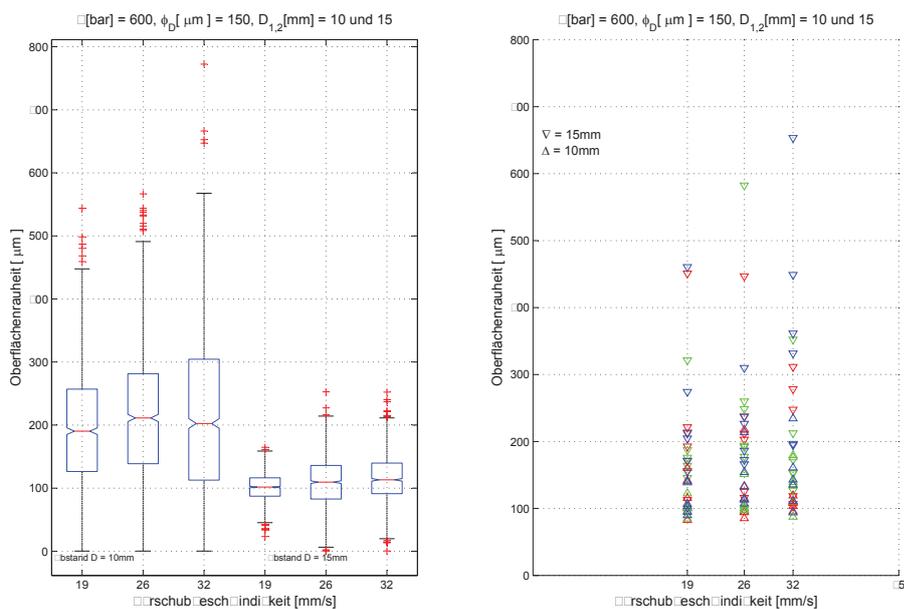


Abbildung B.18: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 600$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

B Untersuchungen im Übergangsbereich zur Bestimmung optimaler Schnittparameter mittels Oberflächenrauheit

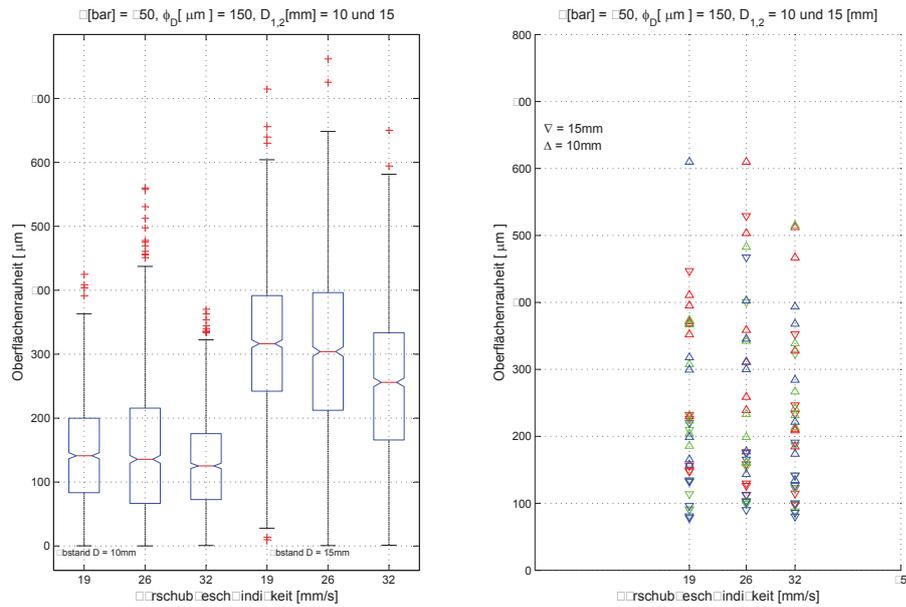


Abbildung B.19: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 750$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

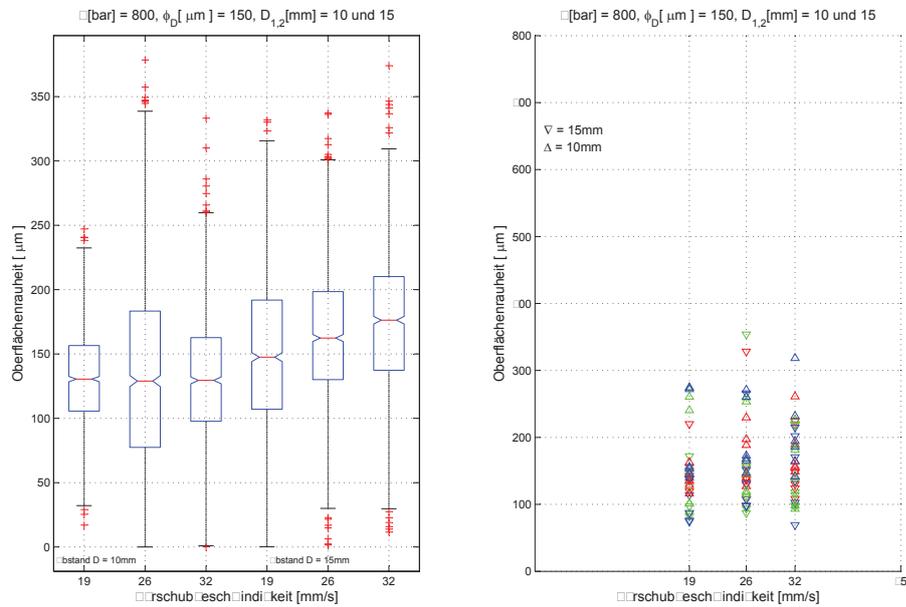


Abbildung B.20: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 800$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19 \ 26 \ 32]$

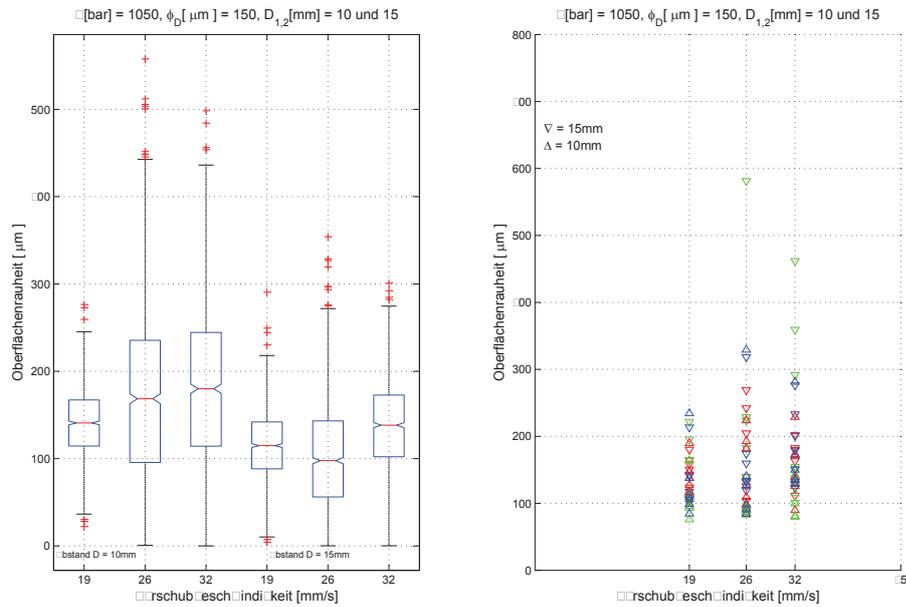


Abbildung B.21: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1050$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

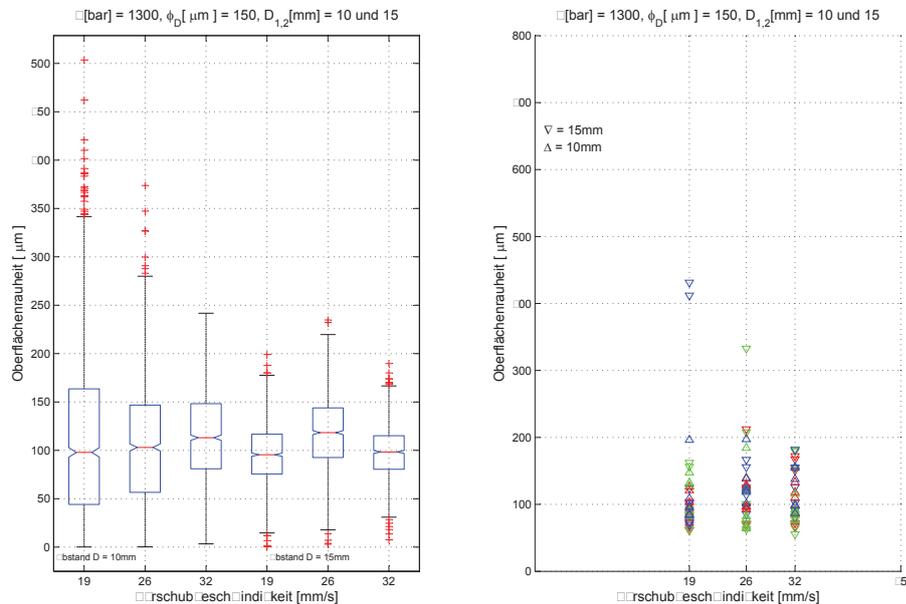


Abbildung B.22: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D[\mu\text{m}] = 150$ und einem Druck von $p[\text{bar}] = 1300$ mit Schneideabstandsvektor $D[\text{mm}] = [10\ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v[\frac{\text{mm}}{\text{s}}] = [19\ 26\ 32]$

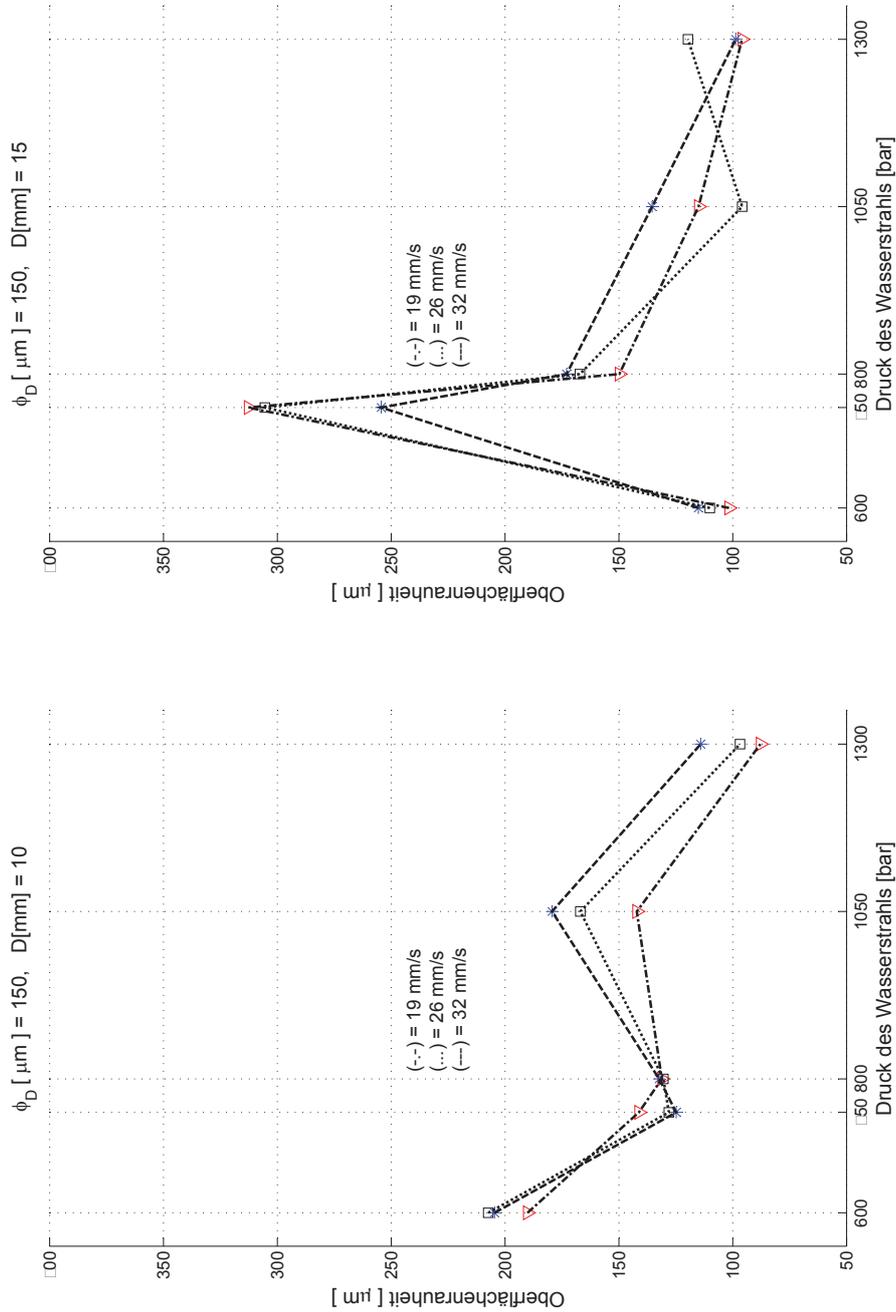


Abbildung B.23: Ergebnis des Schnittprozesses mit einer Systemkonfiguration von $\phi_D = 10$ und einem Druck von $p = 600$ 750 800 1050, 1300] mit Schneideabstandsvektor $D = [10 \ 15]$ und einem Geschwindigkeitsvektor $v = [19 \ 26 \ 32]$

Literaturverzeichnis

- [mat] *MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing.*
<http://www.mathworks.com/>. <http://www.mathworks.com/>
- [VDI 1994] *VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 2.* [Stand] 2009-03. Berlin: Beuth, 1994 (VDI-Richtlinien-2906, Schnittflächen beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall, Blatt 1 Allgemeines und Blatt 10 Abrasiv-Wasserstrahlschneiden)
- [DIN 1998] *Deutsche Normen-4287.* Bd. (ben): Benennungen, Definitionen, und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit: *Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Oberflächenbeschaffenheit.* Berlin: Beuth, 1998. – DIN EN ISO 4287
- [DIN 2003a] *Fertigungsverfahren-Begriffe, Einteilung = Manufacturing processes.* [Stand]: September 2003. Berlin: Beuth, 2003 (Deutsche Norm-8580). – Ersatz für DIN 8580:1974-06
- [DIN 2003b] *Deutsche Normen-8589-6.* Bd. Teil 6: Sägen- Einordnung, Unterteilung, Begriffe: *Fertigungsverfahren Spanen = Sawing.* [Stand] Sept. 2003. Berlin: Beuth, 2003. – Ersatz für DIN 8589-6:1982-08
- [DIN 2003c] *Strahlverfahrenstechnik-Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren.* Ersatz für DIN 8200:1982-10. Berlin: Beuth, 2003 (Deutsche Normen-8200)
- [Abe u. Watada 1991] ABE, K.; WATADA, A.-E.: Ethylene Absorbent to Maintain Quality of Lightly Processed Fruits and Vegetables. In: *Journal of Food Science* 56 (1991), Nr. 6, 1589 - 1592. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb08647.x>. – ISSN 1750-3841
- [Ahvenainen u. a. 1998] AHVENAINEN, R.; HURME, E.-U.; HÄGG, M.; SKYTTÄ, E.; LAURILA, E.: Shelf-life of pre-peeled potato cultivated, stored and processed by various methods. In: *Journal of Food Protection* 61 (1998), Nr. 5, S. 591–600. – ISSN 0362-028X
- [Alitavoli u. McGeough 1998] ALITAVOLI, M.; MCGEOUGH: An Expert process planning system for meat cutting by high pressure water-jet. In: *Journal of Materials Processing Technology* 84 (1998), S. 130–135
- [Allende u. a. 2006] ALLENDE, Ana; TOMÁS-BARBERÁN, Francisco-A.; GIL, María-I.: Minimal processing for healthy traditional foods. In: *Trends in Food Science & Technology* 17 (2006), Nr. 9, 513 - 519. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.005>. – ISSN 0924-2244. – INTRADFOODS - Innovations in Traditional Foods - EFFoST 2005 conference

- [Allong u. a. 2001] ALLONG, R.; WICKHAM, L.-D.; MOHAMMED, M.: Effect of slicing on the rate of respiration, ethylene production and ripening of mango fruit. In: *Journal of Food Quality* 24 (2001), 405-419. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4557.2001.tb00619.x>. – ISSN 1745-4557
- [Angermann u. a. 2007] ANGERMANN, A.; BEUSCHEL, M.; RAU, M.; WOHLFARTH, U.: *MATLAB - Simulink - Stateflow: Grundlagen, Toolboxes, Beispiele*. 5. Aufl. München: Oldenbourg, 2007. – ISBN 978-3-486-58272-7
- [Arai u. a. 1985] ARAI, M.; TABAT, M.; HIROYASU, H.: Desintegration process and spray characterisation of fuel jet injected by a diesel nozzle. In: *SAE Paper:840275* (1985)
- [Arpaia u. a. 2004] ARPAIA, Mary-L.; VAN-ROOYEN, Zeldá; BOWER, J.-P.; HOFMAN, Peter-J.; WOOLF, Allan-B.: Las prácticas culturales influyen sobre la calidad de la fruta en post cosecha. In: *2 Seminario Internacional de Paltos, Chile 29.09-01.10 2004* (2004)
- [Atkins u. De-Paula 2008] ATKINS, Peter-W.; DE-PAULA, Julio: *Kurzlehrbuch physikalische Chemie*. 4., Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2008 (Bachelor). – ISBN 978-3-527-31807-0
- [Bansal u. Walker 1999] BANSAL, R.-K.; WALKER, J.-T.: A Study of High Pressure Water Jets For Cutting Chicken Breast Meat. In: *Journal of Food Process Engineering* 22 (1999), Nr. 4, 307-318. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.1999.tb00487.x>. – ISSN 1745-4530
- [Barry-Ryan u. O'Beirne 1998] BARRY-RYAN, C.; O'BEIRNE, D.: Quality and Shelf-life of Fresh Cut Carrot Slices as Affected by Slicing Method. In: *Journal of Food Science* 63 (1998), Nr. 5, 851-856. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb17913.x>. – ISSN 1750-3841
- [Bässmann u. Kreyß 2004] BÄSSMANN, Henning; KREYSS, Jutta: *Bildverarbeitung Ad Oculos*. 4.Aufl. Berlin: Springer, 2004 (X.media.press). – ISBN 3-540-21029-6
- [Becker u. Gray 1992] BECKER, R.; GRAY, G.-M.: Evaluation of a Water Jet Cutting System for Slicing Potatoes. In: *Journal of Food Science* 57 (1992), Nr. 1, 132 - 137. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb05440.x>. – ISSN 1750-3841
- [Beutin 1975] BEUTIN, Ernst-F.: *Flüssigkeitsschlag, Grundlagen der Beanspruchung und ihre technische Nutzanwendung*. Deutschland, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 1975
- [Bimbenet u. a. 2007] BIMBENET, Jean-Jacques; SCHUBERT, Helmar; TRYSTRAM, Gilles: Advances in research in food process engineering as presented at ICEF 9. In: *Journal of Food Engineering* 78 (2007), Nr. 2, 390 - 404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.020>. – ISSN 0260-8774
- [Bingmann u. a. 2000] BINGMANN, D.; WIEMANN, M.; SPECKMANN, E.-J.; KÖHLING, R.; STRAUB, H.; DUNZE, K.; WITTKOWSKI, W.: Cutting of living hippocampal slices by a highly pressurised water jet (macromingotome). In: *Journal of Neuroscience Methods*

- 102 (2000), Nr. 1, 1 - 9. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0270\(00\)00268-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-0270(00)00268-5). – ISSN 0165-0270
- [Bolin u. a. 1977] BOLIN, H.-R.; STAFFORD, A.-E.; KING-JR., A.-D.; HUXSOLL, C.-C.: Factors affecting the storage stability of shredded lettuce. In: *Journal of Food Science* 42 (1977), Nr. 5, 1319-1321. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb14487.x>. – ISSN 1750-3841
- [Bourne 2002] BOURNE, Malcolm C.: *Food texture and viscosity: concept and measurement*. 2nd ed. San Diego [u.a.]: Academic Press, 2002 (Food science and technology). – ISBN 0-12-119062-5
- [Brüser 2008] BRÜSER, Christian: *Effizienzsteigerung beim Wasserstrahlschneiden von Zuckerrüben*. Aachen, Diss., 2008
- [Brüser u. Harms 2005] BRÜSER, C.; HARMS, H.-H.: Alternative Schneidtechniken zum Trennen organischer Güter. In: *Landtechnik* 60 (2005), Nr. 5, S. 254-255
- [Burger u. Burge 2006] BURGER, Wilhelm; BURGE, Mark-James: *Digitale Bildverarbeitung: eine Einführung mit Java und ImageJ*. 2.Aufl. Berlin: Springer, 2006 (X-media-pressX.media.press). – ISBN 3-540-30940-3; 978-3-540-30940-6
- [Cardoni u. a. 2006] CARDONI, Andrea; MACBEATH, Alan; LUCAS, Margaret: Methods for reducing cutting temperature in ultrasonic cutting of bone. In: *Ultrasonics* 44, Supplement (2006), Dezember, Nr. 0, e37-e42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2006.06.046>. – DOI 10.1016/j.ultras.2006.06.046. – ISSN 0041-624X
- [Carreño-Olejua u. a. 2009] CARREÑO-OLEJUA, René; HOFACKER, Werner; HENSEL, Oliver: Use of Image Analysis in Process Control of High Pressure Water-Jet Peeling and Cutting of Fruits. In: *ASABE International Meeting. Reno, Nevada (USA) June 21 - 24 (2009)*, S. paper N.096446.
- [Chakravarthy u. Babu 1999] CHAKRAVARTHY, P.-Sitarama; BABU, N.-Ramesh: A New Approach for Selection of Optimal Process Parameters in Abrasive Water Jet Cutting. In: *Materials and Manufacturing Processes* 14 (1999), Nr. 4, 581 - 600. <http://dx.doi.org/10.1080/10426919908914851>
- [Chandrapala u. a. 2012] CHANDRAPALA, Jayani; OLIVER, Christine; KENTISH, Sandra; ASHOKKUMAR, Muthupandian: Ultrasonics in food processing, Food quality assurance and food safety. In: *Trends in Food Science & Technology* (2012), Nr. 0. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2012.01.010>. – DOI 10.1016/j.tifs.2012.01.010. – ISSN 0924-2244
- [Chemat u. a. 2011] CHEMAT, Farid; ZILL-E-HUMA; KHAN, Muhammed K.: Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. In: *Ultrasonics Sonochemistry* 18 (2011), Juli, Nr. 4, 813-835. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>. – DOI 10.1016/j.ultsonch.2010.11.023. – ISSN 1350-4177
- [Cheroudi u. a. 1985] CHEROUDI, B.; ONUMA, Y.; CHEN, S.-H.; BRACCO, F.-V.: On the intact core of fullcone sprays. In: *SAE Paper:850126* (1985)

- [Choi u. Li 2006] CHOI, Hongseok; LI, Xiaochun: Experimental study of laser–cheese interaction for making of thin cheese slices with complex shapes. In: *Journal of Food Engineering* 75 (2006), Juli, Nr. 1, 90–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.052>. – DOI 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.052. – ISSN 0260–8774
- [Cliff u. a. 2010] CLIFF, Margaret A.; TOIVONEN, Peter M.A.; FORNEY, Charles F.; LIU, Patty (Pei-Yi); LU, Changwen: Quality of fresh-cut apple slices stored in solid and micro-perforated film packages having contrasting O₂ headspace atmospheres. In: *Postharvest Biology and Technology* 58 (2010), Dezember, Nr. 3, 254–261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2010.07.015>. – DOI 10.1016/j.postharvbio.2010.07.015. – ISSN 0925–5214
- [Emadi u. a. 2008a] EMADI, Bagher; ABBASPOUR-FARD, M.-H.; YARLAGADDA, P.-K.-D.-V.: Mechanical peeling of pumpkins. Part 1: Using an abrasive-cutter brush. In: *Journal of Food Engineering* 89 (2008), Nr. 4, 448 - 452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.026>. – ISSN 0260–8774
- [Emadi u. a. 2008b] EMADI, Bagher; ABBASPOUR-FARD, M.-H.; YARLAGADDA, P.-K.-D.-V.: Mechanical peeling of pumpkins. Part 2: Modeling of peeling process. In: *Journal of Food Engineering* 89 (2008), Nr. 4, 453 - 459. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.028>. – ISSN 0260–8774
- [Emadi u. a. 2007] EMADI, Bagher; KOSSE, Vladis; YARLAGADDA, P.-K.-D.-V.: Abrasive peeling of pumpkin. In: *Journal of Food Engineering* 79 (2007), Nr. 2, 647 - 656. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.079>. – ISSN 0260–8774
- [Fritz 2010] FRITZ, Alfred Herbert (Hrsg.): *Fertigungstechnik*. 9. Aufl. Berlin: Springer, 2010. – ISBN 978–3–642–12878–3
- [Gil u. a. 2006] GIL, María-I.; AGUAYO, E.; KADER, Adel-A.: Quality Changes and Nutrient Retention in Fresh-Cut versus Whole Fruits during Storage. In: *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 54 (2006), Nr. 12, 4284 - 4296. <http://dx.doi.org/10.1021/jf060303y>. – ISSN 0021–8561
- [Haller u. a. 2002] HALLER, K.-K.; VENTIKOS, Y.; POULIKAKOS, D.; MONKEWITZ, P.: Computational study of high-speed liquid droplet impact. In: *Journal of Applied Physics* 92 (2002), Nr. 5, 2821 - 2828. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1495533>. – ISSN 0021–8979
- [Hammelmann 1997] HAMMELMANN, Frank: *Die Anwendung der Hochdruckwassertechnik beim Bohren, Kerben und Spalten von Gestein*. Deutschland, TH Aachen, Diss., 1997
- [Henning 1998] HENNING, A.: Cutting with high pressure jet in the food industry. In: *Fleischwirtschaft International* 78 (1998), S. 30–33. – ISSN 0015–363X
- [Henning 2008] HENNING, Axel: *Modellierung der Schnittgeometrie beim Schneiden mit dem Wasserabstrahlstrahl*. Heimsheim, Diss., 2008
- [Hund u. Stösser 1984] HUND, U.; STÖSSER, R.: Einfluss der Blütenstellung innerhalb der Infloreszenz auf das Pollenschlauchwachstum und die Fruchtentwicklung beim Apfel. In: *Mittlg. Klosterneuburg* 34 (1984), S. 261 – 268.

- [Jähne 2004] JÄHNE, Bernd: *Practical handbook on image processing for scientific and technical applications*. 2. ed. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press, 2004. – ISBN 0–8493–1900–5
- [Kamel 2004] KAMEL, Mohamed: *waterjet cutting up to 900*. Deutschland, Universität Hannover, Diss., 2004
- [Klocke u. König 2007] KLOCKE, F.; KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung*. 4. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (VDI-Buch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-48954-2>. – ISBN 978–3–540–48954–2
- [Kümmel 2007] KÜMMEL, Wolfgang: *Technische Strömungsmechanik: Theorie und Praxis*. 3. Wiesbaden: Teubner, 2007. – ISBN 978–3–8351–0141–8 ; 3–8351–0141–2
- [Lana u. a. 2005] LANA, M.-M.; TIJSKENS, L.-M.-M.; VAN KOOTEN, O.: Effects of storage temperature and fruit ripening on firmness of fresh cut tomatoes. In: *Postharvest Biology and Technology* 35 (2005), Nr. 1, 87 - 95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.07.001>. – ISSN 0925–5214
- [Lefevre u. a. 2006] LEFEVRE, I.; LEFEVRE, R.; RIDDER, H. G.; RIDDER, D.; HILLER, W.; WERTH, H.: Advances in Water Jet Cutting Technology: High Capacity Cutting with 180kW as the next step after 6kbar Cutting. In: *18th International Conference on Water Jetting* (2006), S. 13–15
- [Ligocki 2005] LIGOCKI, Andreas: *Schneiden landwirtschaftlicher Güter mit Hochdruckwasserstrahl*. Aachen, Diss., 2005
- [Lobash u. a. 1990] LOBASH, F.; LYONS, J.-T.; MORRISON, C.-H.; RUSTAD, S.-C.: *Apparatus and method utilizing a water jet for cutting frozen fish slabs into a plurality of individual portions*. United States Patent 5031496, <http://www.freepatentsonline.com/5031496.html>, abgerufen am 27.08.2010., 1990
- [Louis 1991] LOUIS, H.: Einführung in die Wasserstrahltechnologie in: Der Wasserstrahl als Werkzeug für Industrielle Fertigung. In: *VDI-Bildungswerk*., BW 531 BW 531 (1991), S. 1–22
- [Lucas u. a. 2005] LUCAS, M.; CARDONI, A.; MACBEATH, A.: Temperature Effects in Ultrasonic Cutting of Natural Materials. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005), Nr. 1, 195–198. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60082-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60082-1). – DOI 10.1016/S0007–8506(07)60082–1. – ISSN 0007–8506
- [McGlynn u. a. 2003] MCGLYNN, W.-G.; BELLMER, D.-D.; REILLY, S.-S.: Effect of precut sanitizing DIP and water jet cutting on quality and shelf-life of fresh-cut watermelon. In: *Journal of Food Quality* 26 (2003), Nr. 6, 489–498. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4557.2003.tb00263.x>. – ISSN 1745–4557
- [Merle 1993] MERLE, C.: Performances of HP fluid jet to cut food products. In: *7th American Water Jet Conference. August 28-31, Seattle, Washington* 7 (1993)

- [Michailovich u. a. 2007] MICHAILOVICH, O.; RATHI, Y.; TANNENBAUM, A.: Image Segmentation Using Active Contours Driven by the Bhattacharyya Gradient Flow. In: *Image Processing, IEEE Transactions on* 16 (2007), nov., Nr. 11, 2787-2801. <http://dx.doi.org/10.1109/TIP.2007.908073>. – ISSN 1057-7149
- [Mizrach 2008] MIZRACH, A.: Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. In: *Postharvest Biology and Technology* 48 (2008), Nr. 3, 315 - 330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.10.018>. – ISSN 0925-5214
- [Nicola u. a. 2009] NICOLA, S.; TIBALDI, G.; FONTANA, E.; FLORKOWSKI, Wojciech-J. (Hrsg.): *Postharvest handling: a systems approach Chapter 10: Fresh-cut Produce Quality: Implications for a Systems Approach*. 2. ed. Burlington, Mass. [u.a.]: Academic Press, 2009 (Food science and technology). – ISBN 978-0-12-374112-7
- [Niemoeller u. a. 2011] NIEMOELLER, Bernd; HARMS, H. H.; LANG, T.: Injection of liquids into the soil with a high-pressure jet. In: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 13 (2011), August, Nr. 2. <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1458>. – ISSN 1682-1130
- [Orr u. Spingler 1985] ORR, A.; SPINGLER, J.-O.: *Method for slicing fruits and vegetables*. United States Patent 4751094, <http://www.freepatentsonline.com/4751094.html>, abgerufen am 27.08.2010., 1985
- [Panchev u. a. 2011] PANCHEV, I.N.; KIRTCEV, N.A.; DIMITROV, D.D.: Possibilities for application of laser ablation in food technologies. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 12 (2011), Juli, Nr. 3, 369-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2011.02.008>. – DOI 10.1016/j.ifset.2011.02.008. – ISSN 1466-8564
- [Parikh u. Lam 2009] PARIKH, Pratik; LAM, Sarah: Parameter estimation for abrasive water jet machining process using neural networks. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 40 (2009), 497-502. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1363-7>. – ISSN 0268 - 3768
- [Portela u. Cantwell 2001] PORTELA, S.-I.; CANTWELL, M.-I.: Cutting Blade Sharpness Affects Appearance and Other Quality Attributes of Fresh-cut Cantaloupe Melon. In: *Journal of Food Science* 66 (2001), Nr. 9, 1265-1270. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb15199.x>. – ISSN 1750-3841
- [Rivera-López u. a. 2005] RIVERA-LÓPEZ, J.; VÁZQUEZ-ORTIZ, F.-A.; AYALA-ZAVALA, J.-F.; SOTELO-MUNDO, R.-R.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G.-A.: Cutting Shape and Storage Temperature Affect Overall Quality of Fresh-cut Papaya cv. „Maradol“. In: *Journal of Food Science* 70 (2005), Nr. 7, 482-489. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb11496.x>. – ISSN 1750-3841
- [Rudy u. Tomlin 1988] RUDY, N.-A.; TOMLIN, J.-S.: *Method and apparatus for automatically cutting food products to predetermined weight or shape*. United States Patent 4875254, <http://www.freepatentsonline.com/4875254.html>, abgerufen am 27.08.2010., 1988

- [Saftner u. a. 2007] SAFTNER, Robert; LUO, Yaguang; MCEVOY, James; ABBOTT, Judith A.; VINYARD, Bryan: Quality characteristics of fresh-cut watermelon slices from non-treated and 1-methylcyclopropene- and/or ethylene-treated whole fruit. In: *Postharvest Biology and Technology* 44 (2007), April, Nr. 1, 71–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.11.002>. – DOI 10.1016/j.postharvbio.2006.11.002. – ISSN 0925–5214
- [Schuchmann u. Schuchmann 2005] SCHUCHMANN, Heike-P.; SCHUCHMANN, Harald: *Lebensmittelverfahrenstechnik: Rohstoffe, Prozesse, Produkte*. Weinheim: WILEY-VCH, 2005. – ISBN 3–527–31230–7 ; 978–3–527–31230–6
- [Shimizu 1999] SHIMIZU, S.: Develop of Water Jet Technology. In: *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers* 102(967) (1999), S. 342–348. – ISSN 0021–4728
- [Sigloch 2009] SIGLOCH, Herbert: *Technische Fluidmechanik*. 7. Berlin: Springer, 2009. – ISBN 978–3–642–03089–5
- [Sivanandam u. a. 2007] SIVANANDAM, S.-N.; SUMATHI, Sai; DEEPA, S.-N.: *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Berlin: Springer, 2007. – ISBN 3–540–35780–7 ; 978–3–540–35780–3.
- [Srinivasu u. Babu 2008] SRINIVASU, D.; BABU, N.: An adaptive control strategy for the abrasive waterjet cutting process with the integration of vision-based monitoring and a neuro-genetic control strategy. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 38 (2008), 514 - 523. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1294-3>. – ISSN 0268–3768
- [Sturm u. Hofacker 2009] STURM, B.; HOFACKER, W.: Optical Monitoring and Control of Drying Processes. In: *DAAAM International Scientific Book 2009* (2009), 501 - 512. <http://dx.doi.org/10.2507/daaam.scibook.2009.50>. ISBN 978–3–901509–69–8
- [Suutarinen u. a. 2003] SUUTARINEN, M.; MUSTRANTA, A.; AUTIO, K.; SALMENKALLIO-MARTTILA, M.; AHVENAINEN, R.; BUCHERT, J.: The potential of enzymatic peeling of vegetables. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83 (2003), 1556–1564. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1579>. – ISSN 1097–0010
- [Tatsumi u. a. 1993] TATSUMI, Y.; WATADA, A.-E.; LING, P.: Sodium Chloride Treatment or Waterjet Slicing Effects on White Tissue Development of Carrot Sticks. In: *Journal of Food Science* 58 (1993), Nr. 6, 1390–1392. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb06189.x>. – ISSN 1750–3841
- [Tizhoosh 1998] TIZHOOSH, Hamid R.: *Fuzzy-Bildverarbeitung: Einführung in Theorie und Praxis*. Berlin: Springer, 1998. – ISBN 3–540–63137–2
- [Toivonen u. a. 2006] TOIVONEN, P.-M.-A.; KAPPEL, F.; STAN, S.; MCKENZIE, D.-L.; HOCKING, R.: Factors affecting the quality of a novel fresh-cut sweet cherry product. In: *Food Science & Technology* 39 (2006), Nr. 3, 240 - 246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2005.02.014>. – ISSN 0023–6438

- [Toivonen u. Brummell 2008] TOIVONEN, Peter.-M.-A.; BRUMMELL, D.-A.: Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. In: *Postharvest Biology and Technology* 48 (2008), Nr. 1, 1 - 14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.004>. – ISSN 0925–5214
- [Toker u. Bayindirli 2003] TOKER, Ilkem; BAYINDIRLI, Alev: Enzymatic peeling of apricots, nectarines and peaches. In: *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie* 36 (2003), Nr. 2, 215 - 221. [http://dx.doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00203-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00203-7). – ISSN 0023–6438
- [Valco u. a. 1979] VALCO, T.-D.; COBLE, C.-G.; RUFF, J.-H.: High pressure water jet cutting of sugarcane, American Society of Agricultural Engineering. In: *Winter Meeting ASAE 1979 New Orleans* (1979), S. Paper 79–1569.
- [Watada u. Qi 1999] WATADA, Alley-E.; QI, Ling: Quality of fresh-cut produce. In: *Postharvest Biology and Technology* 15 (1999), Nr. 3, 201 - 205. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00085-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00085-4). – ISSN 0925–5214
- [Wiley 1994] WILEY, R.-C. (Hrsg.): *Minimally processed refrigerated fruits and vegetables*. New York [u.a.]: Chapman and Hall, 1994. – ISBN 0–412–05571–6
- [Zahn u. a. 2006] ZAHN, Susann; SCHNEIDER, Yvonne; ROHM, Harald: Ultrasonic cutting of foods: Effects of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work. In: *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 7 (2006), Dezember, Nr. 4, 288–293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2006.04.004>. – DOI 10.1016/j.ifset.2006.04.004. – ISSN 1466–8564

ISSN 0931-6264